

Riffelbildung in Wälzlagern infolge elektrischer Korrosion.

Von ARTUR KOHAUT, z. Z. Astheim*.

Mit 31 Textabbildungen.

(Eingegangen am 25. März 1948.)

I. Einleitung.

In den Wälzlagern elektrischer Maschinen treten manchmal nach kurzer Zeit Störungen auf. Wenn ein schadhafte Lager ausgebaut wird, sieht man auf den Rollbahnen der Lagerringe wellenförmige Vertiefungen, die ihres Aussehens wegen allgemein als Riffel bezeichnet werden. Als Beispiel zeigt die Abb. 1 einen Teil der Rollbahn des Außenringes eines Ringzylinderlagers, das als Achslager in einem Motorwagen der Hamburger S-Bahn gelaufen ist. Man kennt viele, zur Lagerachse parallel liegende wellenförmige Vertiefungen, die sog. Riffel. Bei genauerer Betrachtung erkennt man ferner, daß einzelne Riffel

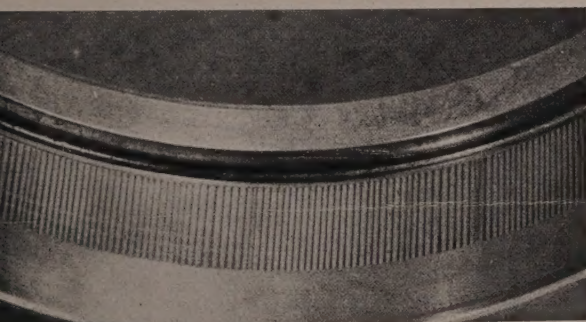


Abb. 1. Ein Teil der Rollbahn des Außenringes eines Ringzylinderlagers, das infolge Stromdurchgangs schadhafte wurde.

der Riffelgruppen oft besonders ausgeprägt sind und periodisch wiederkehren. Auch die Rollkörper zeigen meist immer eine mehr oder weniger ausgebildete Riffelung.

Als weiteres Beispiel zeigt die Abb. 2 einen Teil der Rollbahn des Innenringes eines Zylinderlagers, in dem der Läufer eines Schweißumformers gelagert war. Bei diesem Lager zeigte sowohl der Innenring als auch der Außenring Riffel; die (nicht abgebildeten) Rollen zeigten jedoch keine Riffel und auch sonst kein irgendwie bemerkenswertes Aussehen. Am Innenring erkennt man verschiedene, besonders ausgeprägte Riffelgruppen, die über den Umfang periodisch verteilt sind; in der Abb. 2 sind sie mit Pfeilen bezeichnet. Weitere Beispiele für Lager, in denen Rollbahnen infolge Stromdurchgangs Riffel aufgetreten sind, finden sich bei JÜRGENSMEYER [9].

Die beschriebenen Schäden treten in Lagern auf, bei denen sich im Betrieb wenigstens ein Lagerring dreht, bei denen also die Rollbahnen der Ringe und der Rollkörper dauernd überrollt werden, wenn durch das Lager von dem einen Ring über die Rollkörper

zum anderen Ring Strom fließt. Nur diese Art von Riffelbildung soll hier näher untersucht werden. Es gibt nämlich noch eine zweite Art von Riffelbildung, die dann auftritt, wenn ein Lager, das sich *nicht*

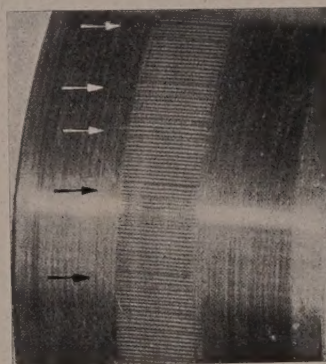


Abb. 2. Der Innenring eines Ring-Zylinderlagers WUL 105, das infolge Stromdurchgangs schadhafte wurde. Die Rollbahn dieses Ringes hat keine Gerade, sondern einen Kreisbogen mit großem Radius zur Erzeugenden; daher bildete sich nur in der Mitte der Rollbahn eine Laufsperre aus.

oder nur um einen sehr kleinen Winkel dreht, wechselnd belastet wird, ohne daß dabei ein elektrischer Strom von außen her durch das Lager fließt [1].

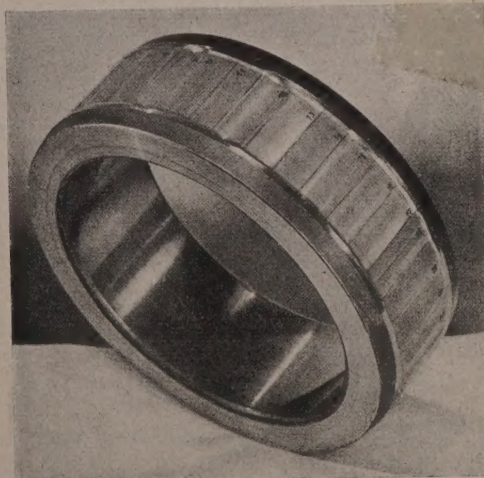


Abb. 3. Der Innenring eines Ring-Zylinderlagers NUM 150, das durch mechanische Wechselbeanspruchung beschädigt wurde.

Diese letztere Art von Riffelbildung, für die die Abb. 3 ein Beispiel gibt, soll hier nicht behandelt werden.

II. Der Stand der Erkenntnisse.

Nach JÜRGENSMEYER [9] treten die oben beschriebenen Schäden nur bei Gleichstrom auf und werden wahrscheinlich dadurch erzeugt, daß der Schmierfilm im Wälzlager je nach der Belastung in seiner Dicke schwankt. An den Stellen geringster

* Diese Arbeit wurde in den Jahren 1942/43 in dem damaligen Laboratorium der Firma Kugelfischer, Georg Schäfer u. Co., Schweinfurt, ausgeführt; sie konnte aus äußeren Gründen nicht früher veröffentlicht werden.

Dicke findet der Stromübergang statt und erzeugt eine große Anzahl dünner Grate; hierdurch werden die Laufbahnen geschwächt, so daß sich an diesen Stellen Eindrücke ausbilden können.

In Fahrzeuggetrieben mit elektromagnetischer Gangschaltung fand MAURIN [12] Zylinderlager, die

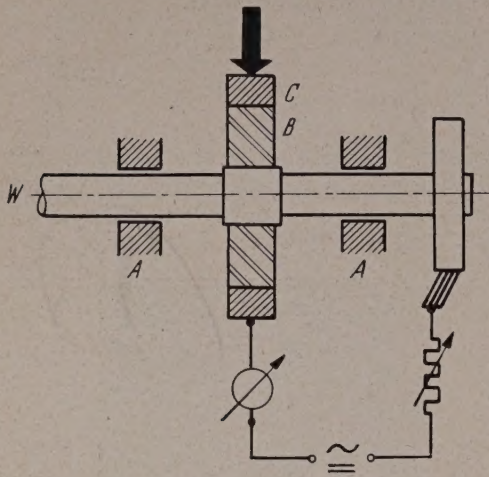


Abb. 4. Die Versuchsanordnung zur Riffelbildung, schematisch dargestellt.

gleichfalls die oben beschriebenen riffelartigen Zerstörungen aufwiesen (s. Abb. 5 der angeführten Veröffentlichung). Er erkannte, daß diese Zerstörungen durch elektrische Ströme verursacht wurden. Den Vorgang der Zerstörung erklärte er als Elektrolyse: Das Schmiermittel, das sich im Getriebe befindet und das auch zur Schmierung der Lager dient, bildet den Elektrolyten. Bei reinen Mineralölen entstehen durch Oxydation wasserlösliche Säuren; ferner entstehen andere, nicht wasserlösliche Produkte, die eine Emulsion mit saurem Charakter ergeben, welche als Elektrolyt wirken kann; gefettete Öle schließlich enthalten Beimischungen von vegetabilischen Ölen, die zur Bildung von Fettsäuren neigen und so zu einem Elektrolyt werden. Im Betrieb werden die Getriebe sehr warm; ist das Gehäuse des Getriebes luftdicht abgeschlossen, dann wird die Temperatur der Luft im Getriebe bei der nachfolgenden Abkühlung bis unter den Taupunkt sinken, so daß sich Kondenswasser bildet. Alle diese Umstände sorgen also dafür, daß ein Elektrolyt vorhanden ist, und sowie von einer äußeren Stromquelle Strom durch das Lager fließt, tritt Elektrolyse ein.

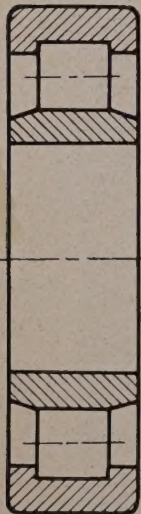


Abb. 5. Schnitt durch ein Ring-Zylinderlager.

Übrigens treten nach MAURIN die charakteristischen Riffel nur bei Wälzlagern auf, deren Rollkörper durch einen Käfig in bestimmten Abständen voneinander gehalten werden; bei Nadellagern, bei denen der Zwischenraum zwischen den beiden Ringen durch sehr viele dünne Zylinderrollen ohne Käfig ausgefüllt ist, treten keine Riffel auf, sondern Korrosion in Form vieler kleiner Grübchen.

EHRT und KÜHNELT [5] untersuchten die Schäden, die miteinander in Eingriff stehende Zahnräder an ihren Zahnflanken erleiden, wenn sie von Strom

durchflossen werden. Im Gegensatz zu MAURIN führen sie die vorzeitigen Zerstörungen der Zahnflanken nicht auf Elektrolyse sondern auf die Funken zurück, die zwischen zwei kämmenden Zahnflanken entstehen. Durch die Funken wird der Werkstoff örtlich erhitzt und dadurch gegen Abrieb weniger widerstandsfähig. Auch auf solchermaßen korrodierten Zahnflanken treten mitunter Riffel der gleichen Art auf, wie sie oben an Wälzlagern gezeigt wurden. EHRT und KÜHNELT haben diesen Umstand wohl festgestellt, aber nicht weiter beachtet; doch zeigt die Abb. 12 ihrer Veröffentlichung eine durch Strom korrodierte Zahnflanke, die sehr deutliche Riffel aufweist. Sie haben ferner festgestellt, daß die Zerstörungen mit wachsender Stromstärke schnell zunehmen und daß sie bei Gleich- und Wechselstrom auftreten. Sie haben somit, wie sich noch zeigen wird, zur Lösung des vorliegenden Problems die bisher meiste Vorarbeit geleistet.

III. Die Vorversuche.

Die bisher vorliegenden Untersuchungen sind also nicht zahlreich und weichen in ihren Ergebnissen erheblich voneinander ab. Daher erschien es zweckmäßig, die verschiedenen Aussagen durch eigene Versuche zu überprüfen. Dazu diente eine Anordnung, wie sie die Abb. 4 schematisch darstellt. Eine Stahlwelle W ist in zwei Lagern A gelagert und trägt in der Mitte das Versuchslager B. Die Lager A sind je nach den gewählten Versuchsbedingungen entweder Ring-Kugellager 6304 nach DIN 625 oder aber Gleitlager. Als Prüflager B wurden fast ausschließlich Ring-Zylinderlager NUL 25 nach DIN 5412 verwendet, s. Abb. 5. Das Versuchslager B sitzt in einem stählernen Umring C. Dieser Umring ist an einer Stelle geschlitzt, damit der Außenring des Versuchslagers B geklemmt wird und sich daher im Betrieb nicht drehen kann. Über den Umring C wird das Lager belastet und der Strom zugeführt. Die zweite Stromzuführung erfolgt über Kohlebürsten und einen Schleifring auf die Welle W und von dort auf den Innenring des Prüflagers B.

Zuerst wurde geprüft, ob tatsächlich nur bei Gleichstrom Riffel auftreten, wie dies JÜRGENS-MEYER angibt, indem durch ein Versuchslager Gleichstrom einer Dynamomaschine, durch ein anderes Wechselstrom von 50 Hz und durch ein drittes Wechselstrom von 500 Hz durchgeleitet wurde, während sich die Lager drehten; in allen Fällen lief der Innenring um, seine minutliche Drehzahl betrug 2940. Die weiteren Einzelheiten über diese Versuche sind in der Tabelle 1 angegeben.

Tabelle 1.

Lager Nr.	Type	Drehzahl in der Minute	Belastung in Kilogramm	Stromart	Stromstärke in Ampere	Versuchsdauer in Stunden
42	NUL 25	2940	8	=	4	48
5	NUL 25	2940	8	~ 50 Hz	4	60
61	NUL 25	2940	8	~ 500 Hz	4,5	24

Die Abb. 6–8 zeigen die Außenringe der Versuchslager. Es ist deutlich zu sehen, daß in allen drei Fällen Riffelbildung aufgetreten ist. Weitere Versuche, die später angestellt wurden, haben dasselbe Ergebnis gezeigt. Damit ist bewiesen, daß

Gegensatz zu JÜRGENSMEYER nicht nur bei Gleichstrom sondern bei jeder Stromart, die heute der Starkstromtechnik gebräuchlich ist, Riffelbildung auftreten kann und bei geeigneten Bedingungen, die noch näher erörtert werden, auch tatsächlich auftritt.

Nach MAURIN [12], der die Riffelbildung auch nur bei Gleichstrom beobachtet hat, entstehen die Riffel durch Elektrolyse. Zur Elektrolyse gehört natürlich ein Elektrolyt, und deshalb hat MAURIN auch sehr ausführlich dargetan, auf welche Art der Schmierstoff einem Elektrolyt werden kann. Um auch diese Ansicht zu überprüfen, habe ich die Lager der obengeführten Versuche (und auch die Lager aller weiteren Versuche) kurz vor Versuchsbeginn sauber ausgewaschen und mit rückstandsfreiem Benzin durchgespült. Dann wurden die Lager mit frischem Nadelagerfett geschmiert. Das Schmierfett war vollkommen säurefrei, hatte aber leicht alkalischen Charakter, wie das bei Wälzlagerfetten zu sein pflegt. Nach den Versuchen, die nur verhältnismäßig kurze Zeit dauerten, wurde das Schmiermittel geprüft, ob es nicht durch irgendwelche Einflüsse oxydiert und zu einem Elektrolyt geworden war. Das Fett hatte sich in dieser Hinsicht nicht meßbar verändert. Der Schmierstoff war also sicher kein Elektrolyt im Sinne MAURINS gewesen. Schon daraus scheint zu folgen, daß der Erklärungsversuch MAURINS nicht aufrechterhalten ist.

Schließlich wurde geprüft, ob bei Nadellagern tatsächlich keine Riffelbildung auftritt, wie dies MAURIN [12] behauptete, indem in der Anordnung der Abb. 4 als Prüflager ein Nadellager NA 25 unterrichtet wurde. Der Innenring dieses Lagers machte 940 Umdrehungen in der Minute, das Lager wurde mit Fett geschmiert und mit 8 kg belastet; durch das Lager floß 4-A-Gleichstrom, der Innenring war Anode. Bereits nach wenigen Laufstunden zeigten die Rollbahnen die charakteristische Laufspur, jedoch zunächst keine Riffel. Nach 30 Stunden traten jedoch Riffel auf und zwar zuerst am Innenring. Die Behauptung MAURINS, daß in Nadellagern keine Riffel auftreten, ist durch diesen Versuch auch widerlegt worden.

Die Vorversuche haben also gezeigt, daß die fraglichen Korrosionsschäden bei jeder technisch vorkommenden Stromart auftreten und daß sie keine elektrolytische Erscheinung im gewöhnlichen Sinne darstellen. Andererseits war jedoch nicht zu verkennen, daß zwischen den Ringen und Rollen der Versuchslager eine Stoffwanderung stattfand. Die Ringe und Rollen des Lagers müssen daher einen elektrischen Kontakt darstellen, der nicht dauernd kurzgeschlossen ist; denn nur in solchen Kontakten beobachtet man Stoffwanderung. Die nächste Aufgabe wird also darin bestehen, die Stoffwanderung in von Strom durchflossenen Wälzlagern näher zu untersuchen.

IV. Das Wälzlager als elektrischer Kontakt.

1. Die wichtigsten Begriffe der Kontaktlehre.

Werden zwei Leiter mit einer bestimmten Kraft gegeneinander gedrückt, dann haben sie eine Fläche, die scheinbare Berührungsfläche gemeinsam [8]. Die Größe dieser Fläche läßt sich für einfache Fälle nach

HERTZ [7] berechnen und hat in unserem Fall, wo sich Zylinder mit parallelen Achsen berühren, angenähert die Form eines Rechteckes. Die scheinbare Berührungsfläche hat aber nur an einzelnen Stellen wirklich metallischen Kontakt. Wieder andere Stellen sind durch eine Molekelhaut voneinander getrennt, die aber so dünn ist, daß sie dem Strom infolge des Tunneleffektes wenig Widerstand entgegensetzt; sie werden als quasimetallische Berührungsflächen bezeichnet. Praktisch rechnet man meist so, als ob



Abb. 6.

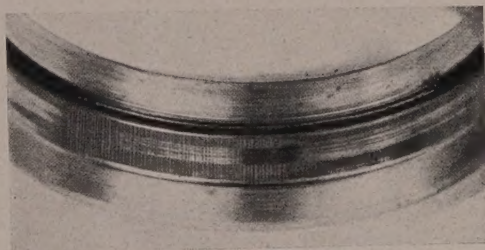


Abb. 7.



Abb. 8.

Abb. 6–8. Die Rollbahn je eines Zylinderlagers NUL 25 mit beginnender Riffelbildung. Durch das Lager der Abb. 6 floß Gleichstrom, durch jenes der Abb. 7 Wechselstrom von 50 Hz und durch das Lager der Abb. 8 500-Hz-Wechselstrom.

die metallischen und die quasimetallischen Berührungsflächen gleich gut leiten würden und nennt die Gesamtheit beider Flächen die leitende Kontaktfläche. Die leitende Kontaktfläche macht nur einen kleinen Teil der scheinbaren Berührungsfläche aus.

In unserem Fall befindet sich zwischen den Kontaktgliedern Schmierstoff, von dem im Kontakt nur einmolekulare Schichten übrigbleiben, die als Epilamen bezeichnet werden. Der weitaus größte Teil der scheinbaren Berührungsfläche ist mit einer störenden Fremdschicht bedeckt, die man als praktisch isolierend ansehen kann. Die Stromleitung wird also nur von einzelnen kleinen Flächen besorgt.

2. Die Widerstands-Spannungs-Kennlinie eines ruhenden, rein metallischen Kontaktes.

Um festzustellen, wie sich ein Kontakt bei Stromdurchgang, also im Betrieb, verhält, betrachtet man den Zusammenhang zwischen der Kontaktpannung

und dem Kontaktwiderstand. Die Linien, die diesen Zusammenhang im Diagramm darstellen, werden gewöhnlich als RU-Linien bezeichnet. Solche RU-Linien wurden in großer Zahl für ruhende Kontakte aufgenommen, gelegentlich auch für bewegte Kontakte, z. B. für Schleifkontakte [8].

Die Abb. 9 zeigt den Verlauf der Widerstands-Spannungs-Kennlinie für einen symmetrischen, rein

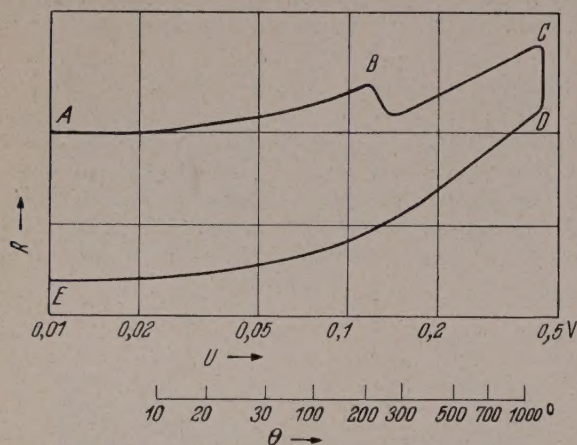


Abb. 9 Die Widerstands-Spannungs-Kennlinie eines ruhenden, rein metallischen Kontaktes. (Aus HOLM: Die technische Physik der elektrischen Kontakte. Berlin: Springer 1941.)

metallischen Kontakt, der von zwei gekreuzten Kupferstäbchen gebildet wird. Die Stäbchen werden mit einer bestimmten Last, der sog. Kontaktlast gegeneinander gedrückt. Verfolgt man den Verlauf des Widerstandes als Funktion der Spannung, so sieht man, daß der Widerstand zunächst schwach und dann immer stärker ansteigt, bis er bei B um

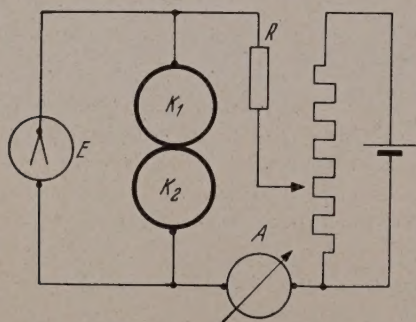


Abb. 10, Messung der Frittspannung und der Frittschlußspannung an einem ruhenden, aus zwei Stahlkugeln gebildeten Kontakt.
 K_1, K_2 Stahlkugeln; R Vorwiderstand; A Strommesser;
 E Elektrometer.

einen gewissen Betrag ziemlich rasch absinkt. Dies ist leicht verständlich: Die leitende Kontaktfläche ist sehr klein, wie bereits hervorgehoben wurde; daher ist die Temperaturerhöhung durch die Stromwärme verhältnismäßig groß. Andererseits haben die Kontaktglieder an der Berührungsstelle durch den dort herrschenden Druck eine gewisse Kaltverfestigung erfahren, die aber bei einer bestimmten Temperatur, der Endfestigkeitstemperatur, wieder verlorengeht. Diese Temperatur wird nun im Kontakt tatsächlich sehr bald erreicht; dadurch wird das Metall weicher und die Berührungsfläche der Kontaktglieder größer und damit der Kontaktwiderstand kleiner. Die RU-Linie zeigt daher einen Abfall wie in der Abb. 9 bei B.

Erhöht man die Stromstärke weiter, dann nimmt auch die Temperatur im Kontakt weiter zu und erreicht schließlich die Schmelzspannung des Kontaktmetalls, der Kontakt schmilzt und schweißt zusammen. Dementsprechend steigt die RU-Linie weiter an, bis sie bei C die Schmelzspannung erreicht hat. Dort wird der Kontakt verschweißt, wodurch sich sein Widerstand verringert. Die RU-Linie fällt um einen gewissen Betrag senkrecht ab, etwa bis zum Punkt D in der Abb. 9. Verringert man nun die Stromstärke wieder, dann wird die erzeugte Stromwärme im Kontakt und damit die Temperatur wieder abfallen, und man erhält das Kurvenstück DE.

3. Die Frittung von Kontakten.

Es sei ein ruhender Kontakt angenommen, dessen leitende Berührungsfläche gleich Null ist, also ein Kontakt, bei dem die beiden Kontaktglieder durch eine dicke Fremdschicht voneinander getrennt sind. Wir wählen als Beispiel zwei Stahlkugeln von 12 mm Durchmesser, die durch Anlassen bei 150° eine Oxydschicht erhalten haben. Die Kontaktlast ist durch das Gewicht der einen Kugel gegeben. Diesen Kontakt schalten wir in Reihe mit einem Widerstand an eine Spannungsquelle mit regelbarer Spannung und beobachten den Kontaktstrom als Funktion der Kontaktspannung in der Anordnung der Abb. 10. Die Meßergebnisse sind in der Tabelle 2 zusammengestellt.

Tabelle 2. Kontakt: Stahlkugel gegen Stahlkugel mit Anlaufschicht, die durch Anlassen bei 150° erzeugt wurde.
Kontaktlast = 7,1 g.

Versuch Nr.	Frittspannung in Volt	Frittschlußspannung in Volt
1	2,0	0,5
2	1,3	0,65
3	2,7	0,6
4	2,4	0,55
5	2,4	0,8
6	1,4	0,45
7	1,8	0,8

Wenn man die Spannung langsam erhöht, dann fließt zunächst praktisch kein Strom durch den Kontakt. Sobald aber eine gewisse Spannung erreicht ist, springt der Strom plötzlich in die Höhe und die Spannung im Kontakt geht zurück; aber meist nicht auf Null, sondern auf Werte in der Größe um 0,5 V; man sagt, der Kontakt wird gefrittet. (Auf der gleichen Erscheinung beruht die Wirkungsweise des Fritters oder Kohärers, der in den Anfängen der drahtlosen Telegraphie als Empfänger diente.) Die Spannung, bei der die Frittung einsetzt, wird Frittspannung genannt, die Kontaktspannung unmittelbar nach der Frittung heißt die Frittschlußspannung. Wie die Tabelle 2 erkennen läßt, schwankt sowohl der Wert der Frittspannung als auch jener der Frittschlußspannung von Versuch zu Versuch, weil es sehr schwer ist, mit einfachen Mitteln reproduzierbare Versuchsbedingungen zu schaffen; kleine Erschütterungen können die Verhältnisse schon stark ändern.

Der Vorgang der Frittung ist von HOLM und seinen Mitarbeitern [8] sowie von PEARSON [13] näher untersucht worden. Während HOLM und seine Mitarbeiter die Frittung von Kontakten untersuchten, die durch Anlaufschichten getrennt waren, hat

ARSON auch Goldkontakte verwendet, deren Abstand auf $1 \cdot 10^{-7}$ cm genau eingeregelt werden konnte. Die Fremdschicht dieser Kontakte bestand aus Luft. Das Ergebnis dieser Untersuchungen folgendes: Wenn die beiden Kontaktglieder auf einen kleinen Abstand genähert werden (einige 10^{-6} cm), bilden sich schon bei Spannungen, die kleiner als die kleinste Durchschlagsspannung, leitende Brücken aus, die von einem Kontaktglied zum anderen hinüberreichen. Für ein gegebenes Elektrodenpaar ist die zur Brückenbildung notwendige Feldstärke eine Konstante, die zwischen 5 und 10^6 V/cm liegt. Die Brücken selbst bestehen aus dem Stoff der Elektroden und werden dadurch gebildet, daß durch elektrostatische Kräfte der Elektroden Stoff entzogen wird [13]. Der Werkstoff der Brücken ist von etwas schwammiger Struktur und unterscheidet sich von unedlen Kontaktgliedern auch mit Oxyden vergeworfen; die Brücken zeigen rein metallische Leitung.

4. Die Stoffwanderung in Abhebekontakten.

Wir haben soeben gesehen, daß Kontakte mit einer Fremdschicht schon bei verhältnismäßig kleiner Spannung durch Brückenbildung leitend werden. Die Brücken werden dadurch gebildet, daß aus den beiden Kontaktgliedern Werkstoff herausgezogen wird. Bei der Frittschlußspannung tritt also eine Stoffwanderung auf. Die Größe der Stoffwanderung ist eine Funktion der Anzahl und Größe der Frittstellen im Kontakt und hängt von der Stärke des Stromes ab, der den Kontakt durchsetzt.

Man müßte also annehmen, daß bei bewegten Kontakten in kurzer Zeit eine merkliche Stoffwanderung von den Elektroden weg stattfindet, die als Feinwanderung bezeichnet wird (im Gegensatz zur Grobwanderung, die bei Lichtbögen auftritt). Dies ist auch tatsächlich der Fall. Obwohl die Verhältnisse bei der Stoffwanderung durch Frittung physikalisch noch wenig geklärt sind, hat man dennoch einige Tatsachen feststellen können, die für die Einwanderung charakteristisch sind [8]. Von diesen Tatsachen interessieren uns im Zusammenhang mit dem vorliegenden Problem folgende zwei:

1. Die Feinwanderung geht immer von der Anode aus.

2. Die der Feinwanderung ausgesetzten Berührungsflächen bekommen gewöhnlich eine körnige Struktur mit etwas abgerundeten Körneroberflächen, die auf Schmelzvorgänge hinweisen.

Andererseits scheint die geringe Abnutzung der Graphit-Metall-Schleifkontakte einer dauernden Stoffwanderung zu widersprechen. Dieser scheinbare Widerspruch löst sich aber, wenn man den Vorgang bei der Frittung eines Schleifkontaktes näher betrachtet [8]. Wenn ein Schleifring unter einer Bürste zu laufen beginnt, dann leitet der Kontakt zunächst schlecht, so daß sich z. B. Niederspannungs-Gleichstrom-Dynamos oft gar nicht erregen wollen. Sobald aber die Kontaktschicht an der Bürste etwa 1,5 V erreicht hat, beginnt der Schleifkontakt gut zu leiten. Die Frittschlußspannung von etwa 1,5 V hat nämlich genügt, um eine große Anzahl von Frittbrücken aufzubauen. Die Bürste hat beim weiteren Lauf immer mit einigen Brücken Kontakt und leitet dementsprechend gut; man sagt, der Schleifkontakt ist durch den Strom formiert worden. Zu jeder Strom-

stärke gehört ein bestimmter Formierungszustand. Ein und dieselbe Brücke bleibt nicht dauernd erhalten und auch nicht dauernd metallisch rein. Aus diesem Grunde schwankt auch die Frittschlußspannung um einen Mittelwert.

5. Die Widerstandsspannungslinie eines bewegten, gefritzten Kontaktes.

Wir hatten oben erwähnt, daß jede Kontaktart eine ihr eigene RU-Linie hat. Wie sieht nun die RU-Linie eines Graphit-Metall-Schleifkontaktes aus? Auf Grund der vorhergehenden Überlegung können wir folgendes erwarten: Solange die Frittschlußspannung noch nicht erreicht wird, ist der Widerstand groß. Sowie aber die Frittschlußspannung erreicht ist, werden so viele Brücken aufgebaut, daß sich gerade die Frittschlußspannung einstellen kann und der Widerstand sinkt rasch ab. Verstärkt man den Strom, dann

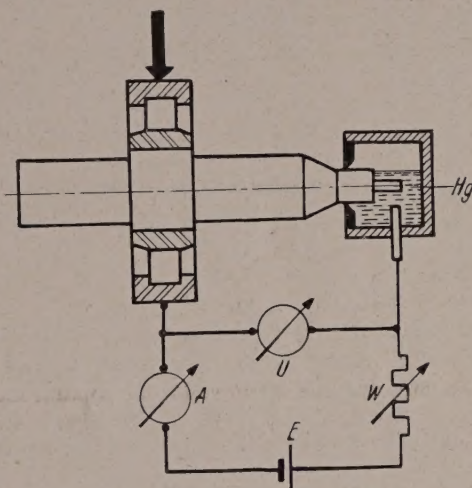


Abb. 11. Wie die RU-Linien eines laufenden Wälzlagers gemessen werden.

geht die Formierung weiter, es bilden sich weitere Brücken, bis wieder die Frittschlußspannung erreicht ist; mit anderen Worten: Die RU-Linie muß im Abstand der Frittschlußspannung parallel zur Widerstandsachse verlaufen. Dieser Verlauf ist auch tatsächlich beobachtet worden und bestätigt die oben auseinandergesetzte Ansicht über die Stromleitung durch Frittbrücken (s. auch Abb. 13).

6. Das laufende Wälzlager als Kontakt mit metallischer Leitung.

Wir sind nun soweit vorbereitet, um zu entscheiden, ob die Stromleitung im Wälzlager elektrolitischer Natur ist, wie es MAURIN annimmt und wobei das Schmiermittel den Elektrolyt darstellen soll, oder ob es sich um metallische Leitung durch Bildung von Frittbrücken handelt. Dazu untersuchen wir zunächst den Verlauf der RU-Linien des Wälzlagers, wenn es mit einem praktisch isolierenden Schmiermittel geschmiert ist, wie z. B. mit reinstem Transformatoröl. Die Schaltung, in der diese RU-Linien aufgenommen wurden, zeigt die Abb. 11. Der Quecksilberkontakt, durch den der Strom dem umlaufenden Kontaktglied zugeführt wird, ist wesentlich. Eine Graphitbürste mit Schleifring würde das Bild verfälschen, da dann im Stromkreis bereits ein Kontaktglied enthalten wäre, das durch Frittbrücken

leitet. In der Abb. 12 sind 4 RU-Linien wieder gegeben, die an ein und demselben Lager bei verschiedenen Drehzahlen und Belastungen aufgenommen wurden. Man erkennt daraus zweierlei: Erstens, daß die RU-Linien innerhalb der Fehlergrenzen parallel zur Widerstandsachse verlaufen und auf der Spannungsachse die Frittschlußspannung angeben. Wie wir vorhin gesehen haben, ist dies ein

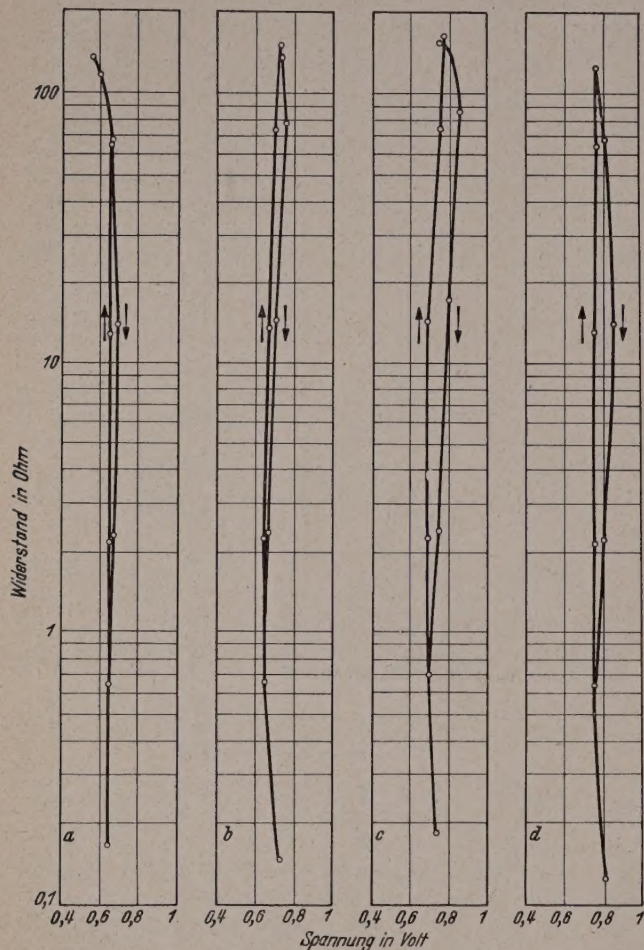


Abb. 12. RU-Linien eines laufenden Wälzlagers (Ring-Zylinderlager NUL 25). Der Innenring ist Anode; Schmiermittel: reines Transformatoröl.

Linie a:	Drehzahl =	600 U/min,	Belastung =	11 kg
Linie b:	"	= 1000 "	"	= 11 "
Linie c:	"	= 1500 "	"	= 11 "
Linie d:	"	= 1000 "	"	= 51 "

Beweis dafür, daß wir es mit Leitung durch Frittschließen zu tun haben. Zweitens, daß die Frittschlußspannung bei allen 4 RU-Linien praktisch gleich ist und daß ihr Wert von 0,7 V erstaunlich gut mit den Werten der Tabelle 2 übereinstimmt, die zwischen ruhenden Stahlkugeln bei verhältnismäßig dünnen Fremdschichten gewonnen wurden. Beide Beobachtungen sprechen für metallische Leitung durch Frittschließen und gegen elektrolytische Leitung.

Nun betrachten wir die RU-Linien der Abb. 12 noch etwas genauer. Die absteigenden Äste liegen immer rechts von den aufsteigenden Ästen, was zunächst ausnahmslos bei allen RU-Linien von Wälzlager festgestellt wurde. Nun wurden die RU-Linien folgendermaßen aufgenommen: Es wurde bei kleinen Stromstärken begonnen, meist bei 5 mA und die dazugehörige Spannung gemessen; dann wurde der Strom stetig bis auf 4 A gesteigert und zwischendrin

einige Strom- und Spannungswerte gemessen. Hieran wurde der Strom wieder bis auf 5 mA geschwächt und dabei wieder bei den gleichen Stromstärken die zugehörigen Spannungen gemessen. Nimmt man die Messung so rasch vor, daß etwa alle 10–20 sec ein Meßpunkt aufgenommen wird, dann mißt man bei abnehmender Stromstärke immer geringere Spannungen, also geringere Widerstände als bei zunehmender Stromstärke. Auch dieser Befund läßt sich durch die Brückenbildung zwanglos erklären: Bei zunehmender Stromstärke müssen immer mehr und mehr Brücken gebildet werden, der Kontakt muß immer neu formiert werden, sonst könnte die Kontaktspannung nicht so genau konstant bleiben, wie sie es tatsächlich ist. Di

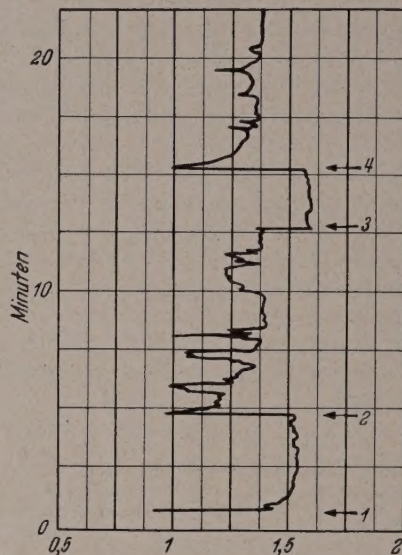


Abb. 13. Wie sich die Spannung an einem Messing-Graphit-Schleifkontakt ändert, wenn der hindurchfließende Strom plötzlich in seine Stärke geändert wird.

einmal gebildeten Brücken haben eine verhältnismäßig große Lebensdauer, was bereits oben beim Schleifkontakt gezeigt wurde. Im Wälzlager, wo die Kontaktpartner aufeinander abrollen, werden die Brücken natürlich sehr viel rascher zerstört als im Schleifkontakt; aber sie haben dennoch eine gewisse Lebensdauer. Folgen also die einzelnen Messungen in Zeitabständen aufeinander, die kleiner sind als die Lebensdauer der Brücken, dann mißt man bei abnehmendem Strom einen kleineren Widerstand, weil dem Strom von der vorhergehenden Formierung noch mehr Brücken zur Verfügung stehen als seiner Stärke eigentlich zukommen würde. Läßt man jedoch zwischen den einzelnen Messungen genügend Zeit verstreichen (1–2 min), dann mißt man bei abnehmendem Strom die gleichen Widerstandswerte wie bei zunehmendem Strom, und die beiden Äste der RU-Linie fallen zusammen.

Man übersieht die hier vorliegenden Verhältnisse noch besser, wenn man den Spannungsverlauf an einem Schleifkontakt registriert, s. Abb. 13. Die Messung wurde in der Schaltung der Abb. 11 dadurch ausgeführt, daß das Voltmeter U durch einen Tintenschreiber und das Wälzlager durch einen Graphit-Messing-Schleifkontakt ersetzt wurde. Der Meßvorgang war folgender: Im Zeitpunkt 1 wird ein Strom von 0,5 A eingeschaltet. Die Spannung steigt ziemlich rasch an und stellt sich auf die bekannte Frittschlußspannung von 1,5 V ein. Im Zeitpunkt 2 wird der

om plötzlich auf den zehnten Teil, also auf 0,05 A mindert. Die Spannung fällt sofort rasch ab und ar auf 1 V; dieser Wert liegt erheblich unter dem Frittschlußspannung, die zum Strom von 0,5 A hört. Tatsächlich beginnt die Spannung auch sofort zusteigen, um sich nach etwa 2 min auf die Frittschlußspannung von 1,4 V einzustellen. Von den Brungen abgesehen bleibt diese Spannung weiterhin nstant. Der Versuch wurde nochmals wiederholt, dem im Zeitpunkt 3 der Strom wieder auf 0,5 A höht und im Zeitpunkt 4 abermals auf 0,05 A verringert wurde. Der Spannungsabfall bei Zeitpunkt 4 und der darauffolgende Anstieg sind hier noch besser erkennen.

Der in der Abb. 13 aufgezeichnete Verlauf der Spannung an einem Schleifkontakt ist also tatsächlich wie er auf Grund der geschilderten Stromleitung

Ionenleitung durch das Schmiermittel scheidet hier aus, weil das Lager bei diesen Versuchen jedesmal mit frischem, reinem Transformatorenöl geschmiert worden war.

Die Spannungskurven der Abb. 14 zeigen aber noch etwas anderes: Nach dem Abfall in den Punkten 1 und 3 steigt die Spannung beim schwächeren Strom zu Werten an, die höher liegen als jene, die dem 10mal stärkeren Strom entsprochen hatten. Umgekehrt fällt die Spannung in dem Punkt 2 bei stärker werdendem Strom wieder ab. Diese Erscheinung wird sofort klar, wenn wir nochmals die RU-Linie der Abb. 9, also die Widerstands-Spannungslinie eines metallischen Kontaktes betrachten. Da die Frittschlußspannung größer als 0,5 V ist, befinden wir uns in einem Gebiet, wo die RU-Linien bereits den Schmelzabfall zeigen. Wie oben gezeigt wurde, tritt

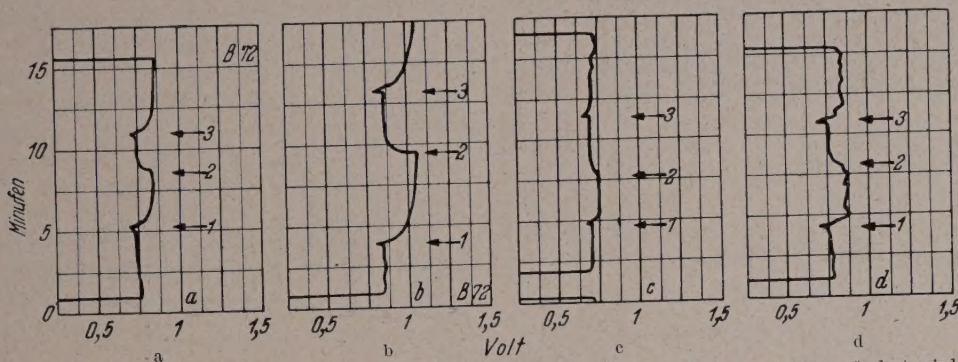


Abb. 14a—d. Wie sich die Spannung an einem Wälzlager ändert, wenn der hindurchfließende Strom ruckartig geändert wird. Den Spannungskurven a und c entsprechen Stromänderungen von 300 auf 30 mA, den Kurven b und d solche von 60 auf 6 mA. Die Kurven bei a und b wurden bei einer Lagerbelastung von 11 kg, die Kurven c und d bei 51 kg Belastung aufgenommen. In den Zeitpunkten 1 und 3 wurde auf schwächeren, in den Zeitpunkten 2 auf stärkeren Strom umgeschaltet.

durch Frittbrücken sein muß. Man erkennt jetzt, warum man bei fallendem Strom andere Spannungen mißt als bei steigendem, wenn die einzelnen Meßpunkte rasch aufeinander folgen: der Wert der jeweils zugehörigen Frittschlußspannung braucht Zeit zum Einstellen. Nimmt man an, daß die Leitfähigkeit eines Schleifkontaktes der Zahl der Frittbrücken verhältnismäßig ist; nimmt man ferner an, daß beim Abschalten oder beim Verringern des Stromes von den nicht mehr benötigten Frittbrücken immer so viele zerstört werden, daß die Zahl der in der Zeiteinheit zerstörten Brücken der Zahl der noch vorhandenen proportional ist, dann muß die Zahl der Frittbrücken nach einer e -Potenz abnehmen, der Widerstand also nach einer e -Potenz zunehmen. Auch diese Annahmen werden durch den Verlauf der Spannungskurven der Abb. 13 bestätigt, besonders schön im Verlauf nach dem Zeitpunkt 4.

Wenn im Wälzlager der gleiche Leitungsmechanismus vorherrscht wie in dem beschriebenen Schleifkontakt, dann muß auch der Spannungsverlauf ähnlich sein, wenn der Strom durch das Lager ruckweise geändert wird. Wie die Abb. 14a—d zeigen, ist dies auch tatsächlich der Fall. In den Zeitpunkten 1 und 3, in denen jeweils vom stärkeren zum schwächeren Strom umgeschaltet wurde, tritt genau wie an den entsprechenden Punkten der Abb. 13 ein Spannungsabfall ein, der wohl auch nur so erklärt werden kann, daß dem verringerten Strom zunächst noch mehr Pfade zur Verfügung stehen als dem stationären Zustand entspricht, was wiederum für den Frittbrücken-Leitungsmechanismus spricht. Eine

dabei im Kontakt ein Schmelzen und Zusammenschweißen auf, wodurch die Kontaktflächen vergrößert, der Widerstand also verkleinert wird. Beim Schleifkontakt kann dieses Schmelzen und Verschweißen kaum vorkommen, denn im eingelaufenen Kontakt ist die tragende Fläche sehr groß im Vergleich zur Kontaktlast, und die einzelnen Punkte der Schleifbürste sind relativ gegen den Schleifring nie in Ruhe. Beim Wälzlager hingegen sind die Berührungsflächen sehr klein, die Drücke in der scheinbaren Berührungsfläche sehr groß (zwischen 10^4 und 10^5 kg/cm²) und wegen des Rollvorganges sind die Berührungspunkte zwischen den Rollkörpern und Rollbahnen im Augenblick der Berührung relativ in Ruhe, so daß im Kontakt leicht Schmelzen auftritt und die leitende Kontaktfläche somit vergrößert wird.

Schließlich zeigen die Spannungskurven der Abb. 14 noch folgendes: Der Unterschied zwischen den Spannungswerten, die zu den einzelnen Stromstärken gehören, ist um so größer, je kleiner die Stromstärken absolut genommen sind, bei denen gemessen wird und je kleiner die Belastung des Lagers, je kleiner also die Kontaktlast ist. Auch diese Erscheinung folgt aus dem Verlauf der Widerstands-Spannungslinie eines metallischen Kontaktes und aus der Annahme der Stromleitung durch Frittbrücken. Je geringer die Stromstärke im Kontakt ist, desto weniger Frittbrücken, also leitende Kontaktflächen, sind vorhanden. Diese wenigen Stellen werden, wenn die Schmelzspannung erreicht wird, verhältnismäßig mehr zusammengedrückt und verschweißt werden als wenn viele solche Stellen vorhanden sind. Genau so

verhält es sich mit der Kontaktlast: Bei kleiner Kontaktlast tragen wenige Stellen, bei großer aber viele; die relative Änderung der tragenden Fläche, die durch das Schmelzen und Verschweißen auftritt, wird bei kleiner Kontaktlast größer ausfallen als bei großer Kontaktlast.

Wir sehen also: Alle Besonderheiten der Stromleitung durch laufende Wälzlager lassen sich leicht erklären, wenn wir annehmen, daß es sich um metallische Stromleitung mittels Frittbrücken handelt.

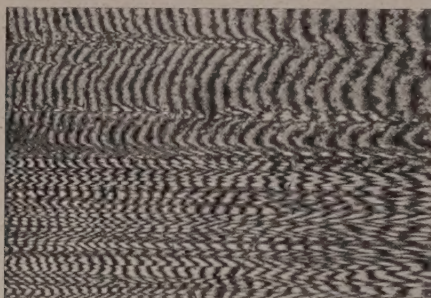


Abb. 15. Der Übergang vom überrollten zum nicht überrollten Teil des Innenringes eines Zylinderlagers NUL 25, durch das Interferenzmikroskop gesehen. Auf dem überrollten Teil ist ein Belag aufgewalzt. 200fach vergrößert.

V. Die Stoffwanderung als primäre Ursache der Riffelbildung.

1. Das Wälzlager als Abhebekontakt.

Im vorhergehenden Abschnitt wurde auseinander-gesetzt, daß in elektrischen Kontakten, die nicht dauernd kurzgeschlossen sind, eine Stoffwanderung auftritt. Das stromdurchflossene Wälzlager ist geradezu ein Muster eines Kontaktes, bei dem ein

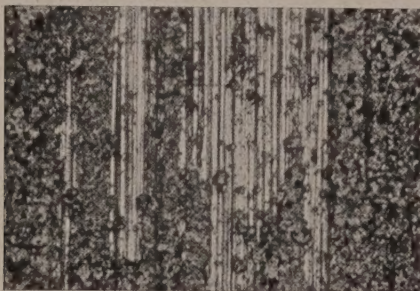


Abb. 16. Der Schliff der Rollbahn eines Lagerringes wird infolge Stromdurchgangs durch das Lager mit Korrosionsprodukten zugedeckt. 200fach vergrößert.

dauerndes Abheben und Schließen der Kontaktflächen eintritt, weil die Wälzkörper über die Rollbahn rollen. Das Abheben und Schließen ist dabei in erster Annäherung einem Abhebekontakt durchaus vergleichbar: Jeder Punkt der Rollkörperoberfläche beschreibt relativ zu den Rollbahnen gemeine Zykloiden; die Tangente an die Zykloide im Berührungspunkt mit der Rollbahn, also in der Spitze der Zykloide, steht auf der Rollbahn senkrecht, die einzelnen Flächenelemente treffen also senkrecht aufeinander und heben sich wieder senkrecht voneinander ab. Wir haben ferner gesehen, daß die Stromleitung durch Frittbrücken vor sich geht und daß die Bildung von Frittbrücken mit einer Stoffwanderung verbunden ist. Daher prüfen wir zunächst, ob die oben angegebenen Merkmale der Stoffwanderung (Feinwanderung) auch beim stromdurchflossenen Wälzlager auftreten.

2. Die Stoffwanderung im stromdurchflossenen Wälzlager.

a) Überprüfung bekannter Merkmale der Feinwanderung. Die Feinwanderung geht erfahrungsgemäß bei Abhebekontakten immer von der Anode weg. Bei einem Wälzlager kann man zwar nicht so einfache Verhältnisse erwarten wie bei einem einfachen Abhebekontakt, doch müßte sich dieser Effekt auch hier feststellen lassen. Die bezüglichen Messungen wurden so vorgenommen, daß die Innenringe von 6 Lagern vor und nach dem Stromdurchgang gewogen wurden. Bei drei Versuchen war der Innenring Kathode, bei den anderen Anode. Die Ergebnisse sind in der Tabelle 3 zusammengestellt. Man erkennt, daß auch im Wälzlager die Stoffwanderung fast nur von der Anode weg vor sich geht, genau wie die Feinwanderung in Abhebekontakten. Die Tabelle 3 läßt außerdem erkennen, daß die Gewichtsabnahme der Ringe bei gleicher Stromstärke nicht zeitproportional vor sich geht. Diese zunächst unverständliche Tatsache ist für die Erklärung der Riffelbildung wesentlich; wir kommen später nochmals darauf zurück.

Tabelle 3. Der Gewichtsverlust der Innenringe von Lagern NUL 25 beim Stromdurchgang, abhängig von der Stromrichtung.

Lager Nr.	Innenring ist	Stromstärke in Ampere	Versuchsdauer in Stunden	Gewichtsverlust in Milligramm
31	Anode	4	10	32
36	„	5	12	61
37	„	5	22	651
34	Kathode	4	10	1
38	„	4	32	3
42	„	4	48	16

Die zweite der bereits erwähnten Tatsachen, die bei der Feinwanderung in Abhebekontakten immer auftritt, besteht darin, daß die der Feinwanderung ausgesetzten Berührungsflächen gewöhnlich eine körnige Struktur zeigen. Dies läßt sich auch beim Wälzlager auf den Rollbahnen und Ringen feststellen, vorausgesetzt, daß diese Rollbahnen vorher genügend glatt waren.

b) Wie sich die Feinwanderung im Wälzlager auswirkt. Nun verfolgen wir den zeitlichen Ablauf der Stoffwanderung und die dabei auftretenden Erscheinungen und zwar wieder an Zylinderlagern NUL 25. Wenn ein Lager einige Zeit gelaufen ist und dabei von Strom durchflossen wurde, dann sieht man auf den Rollbahnen einen dunkelgrauen Belag. Dieser Belag haftet sehr fest auf den Rollbahnen und erweist sich bei näherer Untersuchung im wesentlichen als ein Gemisch aus Eisenoxiden und Kohlenstoff und zeigt poröse bzw. schwammige Struktur. Daß es sich tatsächlich um einen Belag handelt, daß also auf den Rollbahnen etwas aufgetragen wird, erkennt man mit Hilfe des Interferenzmikroskopes. Die Abb. 15 zeigt den Innenring eines Zylinderlagers nach 40 Laufstunden, während durch das Lager 2-A-Wechselstrom von 50 Hz geleitet wurde. Die untere Hälfte des Bildes läßt den ursprünglichen Schliff und seine Rauigkeit erkennen, die obere Hälfte zeigt die überrollte Rollbahn. Zunächst erkennt man, daß die überrollten Teile der Bahn viel glatter geworden sind, denn die Interferenzstreifen zeigen dort nur sehr kleine Auslenkungen; weiter sieht man, daß die Interferenzstreifen dort, wo die überrollte Bahn an

nicht überrollte anstößt, im überrollten Teil von höchsten Punkt der Zylinderfläche weg auskunkt werden, daß also die überrollten Teile der Bahn räumlich höher liegen als die nicht überrollten¹. Schließlich erkennt man noch einige Stellen, noch nicht zugeschmiert sind, bei denen also der ursprüngliche Schliff zu erkennen ist. Auch gewöhnlichen Lichtbild erkennt man manchmal, daß die graue Schicht auf den ursprünglichen Schliff aufgetragen wird. Die Abb. 16 gibt ein Beispiel. Auch die schwammige Struktur der Flächen, die an der Feinwanderung beteiligt sind, erkennt man sehr leicht im Mikroskop.

Wenn die Stoffwanderung noch nicht zu weit fortgeschritten ist, kann man noch eine eigenartige Erscheinung feststellen, die die Abb. 17 erkennen läßt. Diese Abbildung zeigt eine durch Gleichstrom korrodierte Rollbahn an der Grenze einer Riffel. Oben im Bild ist bereits viel Fremdstoff aufgetragen, unterhalb der Riffelkante dagegen erst wenig, so daß der unter liegende Schliff noch zu erkennen ist. Darüber ziehen in schräger Richtung wurmartige Riefen, die auf der Rollbahn aufgetragen sind. Diese Riefen sind offenbar ganze Straßen von aneinandergehefteten Frittbrücken und ein charakteristisches Zeichen der hier auftretenden Stoffwanderung. Bei Wechselstrom sind die entsprechenden Erscheinungen ähnlich, nur bilden sich nicht so lange Zeilen aus, wie bei Gleichstrom die Abb. 18 erkennen läßt.

3. Wie die ersten Riffel entstehen.

Die erste Veränderung, die man an einem stromdurchflossenen Wälzlager feststellen kann, besteht darin, daß sich auf den Rollbahnen des Lagers ein Belag festsetzt. Der Belag haftet zwar verhältnismäßig fest, aber er hat eine viel kleinere Härte als der Werkstoff, aus dem die Lager hergestellt sind. Wenn er daher ungleichmäßig beansprucht wird, dann wird er an den Stellen höherer Beanspruchung zerstört oder weggedrückt werden; und zwar bei Beanspruchungen, die sich bei gesunden Lagern noch nicht bemerkbar machen (s. auch Abb. 26).

a) Die Kraftübertragung von einem Lagerring zum anderen im Wälzlager mit Spiel. In den Wälzlagern, die praktisch verwendet werden, füllen die Wälzkörper den Zwischenraum zwischen den Ringen auch in radialer Richtung nicht vollkommen aus; man sagt, das Wälzlager hat Spiel. Dies gilt nicht nur für das belastete Lager sondern vielmehr noch für das unbelastete. Wird z. B. der Außenring des Lagers nach unten zu belastet, dann ergibt sich ein Zustand, wie in der Abb. 19 übertrieben dargestellt ist. An der Kraftübertragung vom Innenring zum Außenring nehmen also jeweils immer nur einige Rollkörper teil. Bei normalem Lagerspiel sind es etwa $\frac{1}{3}$ aller Rollkörper². Die Zylinderlager NUL 25, die zu den vorliegenden Untersuchungen vorwiegend verwendet wurden, haben insgesamt 12 Rollen, so daß jeweils nur 4 Rollen gleichzeitig an der Kraftübertragung beteiligt sind. Die Druckflächen zwischen den Rollen und den Ringen sind (von den Enden abgesehen) schmale Rechtecke; für die Lager NUL 25 und für

eine Gesamtbelastung von 50 kg haben sie eine Breite von nur etwa 0,2 mm. Daher ist der Druck in den Berührungsflächen groß; er liegt in der Größenordnung von $2 \cdot 10^4$ kg/cm². Dieser hohe Druck muß

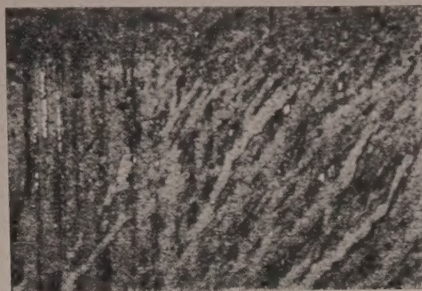


Abb. 17. Korrosionsspuren auf der Rollbahn, wie sie durch Gleichstrom entstehen. 140fach vergrößert.

nun ziemlich plötzlich von den einzelnen Rollen übernommen werden, wenn sie in die belastete Zone einkommen. Die Kraftübertragung von einem Ring über die Rollen zum anderen Ring findet demnach nicht gleichmäßig statt wie etwa beim Gleitlager, sondern mehr oder weniger stoßartig. Die Größe der Stöße hängt von der Größe des Lagerspiels und zudem noch in gewissen Grenzen von der Drehgeschwindigkeit des Lagers ab.

Daß die beschriebenen Stöße tatsächlich auftreten, zeigt das Oszillogramm der Abb. 20, das auf folgende Weise gewonnen wurde: Die Versuchsanordnung der Abb. 4 wurde an den Stellen A mit Gleitlagern ausgetestet, als Versuchslager diente wiederum ein Zylinderlager NUL 25. Die Welle und damit der Lagerinnenring liefen mit 840 Umdrehungen in der Minute um. Die einzelnen Umdrehungen des Innenringes sind am unteren Rand des Oszillogrammes aufgezeichnet, am oberen Rand ist die 50-Hz-Frequenz aufgeschrieben. Mit einem elektrodynamischen Schwingungsmesser wurden die Schwingungen am Außenring des Lagers

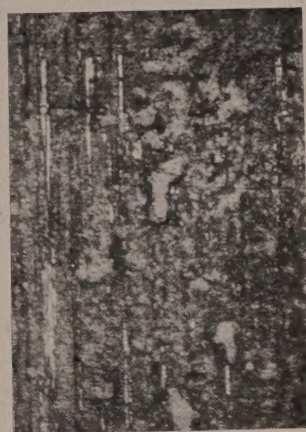


Abb. 18. Korrosionsspuren auf der Rollbahn, durch 50-Hz-Wechselstrom verursacht.

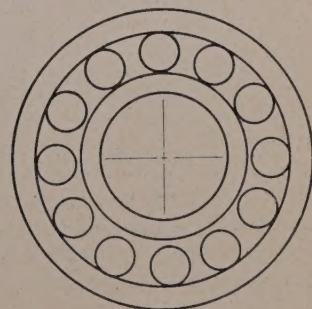


Abb. 19. Das Radialspiel eines Zylinderlagers, schematisch dargestellt.

abgetastet und über einen Verstärker auf den Oszillographen gegeben. Das Oszillogramm zeigt, daß es sich um Schwingungen von rund 600 Hz handelt, die periodisch moduliert erscheinen. Die Modulationsfrequenz beträgt 5 Perioden je Umdrehung des Innenringes. Nun hat das Lager NUL 25 12 Rollen von 6,50 mm Durchmesser, seine Innenring-Rollbahn hat einen Durchmesser von 32,00 mm. Wie man leicht

¹ Wie solche Interferenzbilder auszuwerten sind, findet man z. B. bei KOHAUT [10].

² Die bekannte Berechnung von STRIBECK [15] gilt nur für spielfreie Lager.

nachrechnet [11], laufen somit 5 Rollen je Umdrehung des Innenringes in die belastete Zone ein, also genau die Zahl, die sich am Oszillogramm als Modulationsfrequenz wiederfindet. Die Welle *W* der Abb. 4 ergibt zusammen mit dem Belastungshebel und der Belastungsmasse ein schwingungsfähiges Gebilde; die

blick gerade Berührung und somit Kraftübertragung zwischen den Ringen und Rollen stattfindet. Da findet man nicht nur eine einzelne Riffel, sondern einige, im Abstand der Rollkörperteilung¹ voneinander entfernt liegende Riffel, wenn man den feststehenden (nicht umlaufenden) Lagerring nach ein-

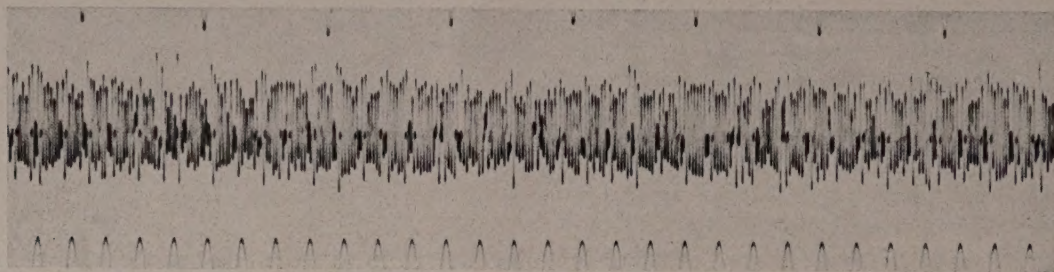


Abb. 20. Der Verlauf der Schwingungen am Außenring eines Zylinderlagers NUL 25, das auf einer in Gleitlagern laufenden Stahlwelle spielt.

gemodelte Grundfrequenz in Abb. 20 entspricht der Eigenfrequenz dieses Systems, was durch besondere Versuche festgestellt wurde.

b) *Die stoßartige Kraftübertragung als Ursache der ersten Riffel.* Das normale, unbeschädigte Wälzlager hält die Beanspruchungen, die durch die soeben geschilderte Kraftübertragung verursacht werden, ohne

Zeit betrachtet. Es bereitet natürlich gewisse Schwierigkeiten, den richtigen Zeitpunkt zu erraten. In Abb. 21 zeigt die ersten entstehenden Riffel am Beispiel eines Kugellager-Außenringes, die Abb. 22 ein Beispiel eines Zylinderlager-Außenringes. An beiden Beispielen ist die Riffelbildung allerdings schon etwas über das erste Stadium hinaus gediehen; dennoch lassen beide Bilder das wichtige Ergebnis erkennen, daß die Riffel zuerst an diskret liegenden, der Wälzkörperteilung entsprechenden Stellen, entstehen.

Die beschriebenen stoßartigen Beanspruchungen wirken nicht nur auf den stillstehenden, sondern auch auf den umlaufenden Ring und daher zeigt auch dieser häufig nach einiger Zeit Riffel. Auch die Rollen weisen oft Riffel auf, in manchen Fällen beginnt die Riffelbildung sogar bei den Rollen. Wenn die Riffelbildung weiterschreitet, soll im folgenden Abschnitt gezeigt werden.

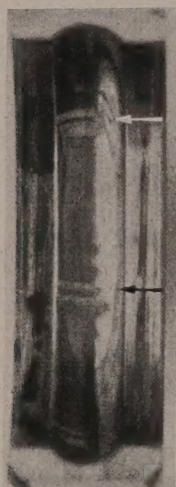


Abb. 21.

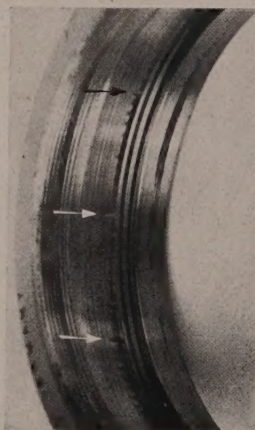


Abb. 22.

Abb. 21. Ein Blick in die Rollbahn des aufgeschnittenen Außenringes eines Kugellagers 6201 nach DIN 625. Der Innenring dieses Lagers lief mit 3000 Umdrehungen je Minute um, während durch das Lager 50-Hz-Wechselstrom floß; dabei war das Lager in Richtung seiner Achse und senkrecht dazu belastet, die Laufspur hat sich daher nur auf der im Bild links liegenden Hälfte der Rollbahn ausbilden können. In dieser Laufspur erkennt man die beginnende Riffelbildung.

Abb. 22. Ein Blick in die Rollbahn des Außenringes eines Zylinderlagers NUL 25. Man erkennt die beginnenden Riffel, die erst über einen Teil der Rollbahnbreite reichen. Einzelne, im Abstand der Rollkörperteilung liegende Riffel sind bereits viel stärker ausgebildet.

Schaden aus. Ein von Strom durchflossenes Wälzlager hingegen hat auf den Rollbahnen eine Fremdschicht aufgewalzt, wie oben näher beschrieben wurde. Diese Fremdschicht hat eine viel geringere Härte und Festigkeit als der Wälzlagerstahl und hält den stoßartigen Beanspruchungen nicht stand; die Folge davon ist, daß dort, wo die Rollen in die belastete Zone einlaufen, die Fremdschicht zerstört wird; dort entstehen die ersten Riffel. Der Stoß überträgt sich natürlich auf den ganzen Wälzlagering und daher wird nicht nur die Stelle höher beansprucht, an der die Rollen in die belastete Zone einlaufen, sondern auch die übrigen Stellen, an denen in diesem Augen-

VI. Schüttelschwingungen als sekundäre Ursache der Riffelbildung.

1. Die Schüttelschwingung als Sonderfall der anharmonischen Schwingung.

Läßt man ein Lager in der Anordnung der Abb. 4 laufen, dann ist der zeitliche Ablauf des Versuches etwa folgender: Zu Beginn zeigt das Lager einen normalen Lauf, doch nach einigen Stunden (je nach der Drehzahl und der Stärke des Stromes, der durch das Lager fließt, früher oder später) beginnt ein charakteristisches Geräusch. Dieses Geräusch wird mit der Zeit rasch lauter und gleichzeitig sinkt die Höhe des Tones, den ein geübtes Ohr heraushören kann. Es treten also Schwingungen auf, die zwar auch am Außenring des Lagers sehr leicht festzustellen sind. Gegen Ende des Versuches werden die Schwingungen so stark, daß man ihretwegen den Versuch abbrechen muß, um den Versuchsstand vor Zerstörungen zu bewahren.

Die nächste Frage ist die nach der Natur dieser Schwingungen. Harmonische Schwingungen können es nicht sein: Dies zeigt ein Blick auf einen beschädigten Lagerring wie ihn als Beispiel die Abb. 1

¹ Die Rollkörper liegen im normalen Lager nicht nebeneinander, sondern werden durch den Käfig in gewissen Abstand voneinander gehalten; der Abstand von einer Rolle zur anderen ist durch die Zahl der im Lager vorhandenen Rollen gegeben; in Anlehnung an die Verhältnisse bei Zahnrädern spricht man hier von der Rollkörperteilung.

ergibt. Wenn die Rollen über diese gewellte Rollbahn rollen, kann es unmöglich bei einer harmonischen Schwingung bleiben, es müssen anharmonische Schwingungen auftreten.

Die Theorie der anharmonischen Schwingungen ist nur für wenige Fälle einigermaßen durchgebildet (z. B. [3]). Bei den behandelten Beispielen ist die Rückstellkraft den Amplituden der Schwingungen nicht proportional, aber immerhin von solcher Art, daß sie durch eine Potenzreihe mit zwei oder höchstens drei Gliedern dargestellt werden kann. Der auch dieser Fall der anharmonischen Schwingung umfaßt nur einen kleinen Teil der wirklich auftretenden Schwingungsformen, und er umfaßt insbesondere nicht jene Schwingungen, die im Wälzlager zur Riffelbildung führen.

Es wurde schon darauf hingewiesen, daß die Wälzlager fast immer mit Spiel betrieben werden; jedenfalls trifft dies in all den Fällen zu, wo Riffelbildung bisher beobachtet wurde. Selbst wenn ein Lager spielfrei eingebaut wurde, wird es infolge der Abwanderung, die oben näher beschrieben wurde, nach einiger Zeit ein gewisses Spiel haben. Wenn nun Stöße auf ein Lager mit Spiel einwirken, können die Ringe eine solche Lage zueinander annehmen, daß die Rollen auch in der belasteten Zone nicht beide Ringe gleichzeitig berühren, sondern nacheinander zwischen ihnen hin- und hergeworfen werden.

2. Die wichtigsten Gesetze der Schüttelschwingung.

Es wurde schon oben erwähnt, daß unter geeigneten Bedingungen die Rollen eines Zylinderlagers zwischen den Ringen hin- und herschwingen können. Um wollen wir diesen Fall durch ein Ersatzschema vereinfachen und an Hand dieses Schemas die wichtigsten Gesetze der Schüttelschwingung berechnen. Wegen weiterer Einzelheiten muß auf das Schrifttum verwiesen werden [3], [17].

Eine Masse M möge sich reibungslos zwischen den beiden Federn F_1 und F_2 geradlinig bewegen können, Abb. 24. Die Anordnung sei so getroffen, daß die Masse längs einer Strecke S frei beweglich ist, ohne daß eine Kraft auf sie einwirkt; die Strecke S nennt man das Spiel. Die Rückstellkraft der Federn sei in ihren Zusammendrückungen verhältnismäßig. Diese letztere Annahme trifft für die Rollen und Ringe eines Zylinderlagers nicht zu; dort wächst die Rückstellkraft rascher als die Zusammendrückung; dennoch soll das einfache Schema hier beibehalten werden, um so mehr, als der Zusammenhang zwischen Druckkraft und Zusammendrückung für den Fall sich berührender Zylinder bis heute nicht streng bekannt ist (s. [2] und [16]).

Durch einen Impuls soll die Masse M eine Geschwindigkeit in Richtung gegen die Feder F_1 erhalten haben. Solange die Masse keine der beiden Federn berührt, wird sie sich mit konstanter Geschwindigkeit bewegen; so wie sie jedoch gegen die Feder F_1 stößt, wird ihre Bewegung eine harmonische, da die Rückstellkraft der Feder nach Annahme ihrer Zusammendrückung verhältnismäßig ist. Die harmonische Bewegung wird so lange andauern, bis die Masse M beim Rückschwingen die Feder F_1 verläßt. Dann folgt längs der Strecke S eine gleichförmige Bewegung der Masse und hierauf durch Zusammen-

wirken mit der Feder F_2 wieder eine harmonische Halbschwingung.

Die Schwingungsdauer einer vollen Schwingung der Masse M setzt sich demnach aus zwei Teilen zusammen: Aus der Dauer der harmonischen Schwingung beim Zusammenwirken der Masse mit den Federn F_1 und F_2 und aus der Zeit, die zum Durchlaufen der Strecke S notwendig ist. Daraus sieht man sofort, daß die Schwingungsdauer wie bei der

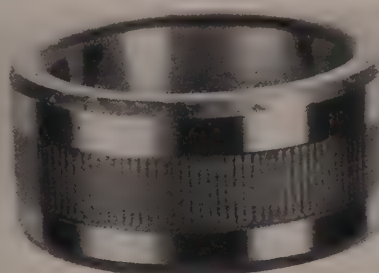


Abb. 23. Der Innenring eines Lagers NUL 25. Die Rollbahn ist bereits stark geriffelt; trotzdem erkennt man die Periode der Wälzkörperteilung in der Riffelung wieder.

harmonischen Schwingung von der Größe der schwingenden Masse und von der Größe der Rückstellkraft der Federn abhängt, daß sie aber zusätzlich noch von der Größe des Spiels S beeinflusst wird.

Die Schwingungsdauer hängt somit auch noch von der Größe der Amplitude ab und unterscheidet sich dadurch grundsätzlich von der harmonischen Schwingung. Man macht sich dies folgendermaßen leicht

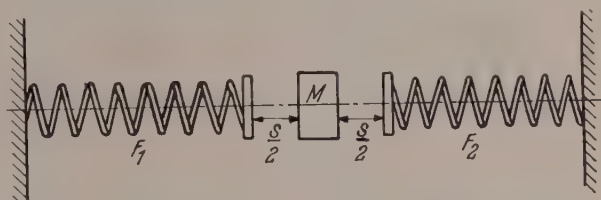


Abb. 24. Schematische Anordnung für Schüttelschwingungen.

klar: Der Anteil der harmonischen Schwingung ist seiner Zeitdauer nach von der Größe der Amplituden unabhängig, was aus den Voraussetzungen und aus der Theorie der harmonischen Schwingung folgt. Aus der Theorie folgt aber auch, daß die Geschwindigkeit im Augenblick des Durchgangs der schwingenden Masse durch die Ruhelage um so größer ist, je größer die Amplitude ist. Bei größeren Amplituden wird die Masse demnach die Strecke S mit größerer Geschwindigkeit, und da es sich dabei um eine gleichförmige Bewegung handelt, auch in kürzerer Zeit durchlaufen als bei kleinen Amplituden. Die Gesamtschwingungsdauer wird daher um so kleiner, je größer die Amplitude der Schüttelschwingung ist. Im Grenzfall wird das Spiel S so rasch durchlaufen werden, daß es zur Schwingungsdauer nicht mehr beiträgt, so daß die Eigenschwingung gleich der des spielfreien, also harmonisch schwingenden Systems wird. Der entgegengesetzte Grenzfall tritt dann ein, wenn sich die Masse M beliebig langsam bewegt; dann trägt die harmonische Schwingung zur Schwingungsdauer nichts mehr bei, die Eigenfrequenz des Systems geht also gegen Null.

Die Eigenschwingungen des Systems der Abb. 24 nehmen mit zunehmender Amplitude alle Frequenzen

zwischen Null und der Eigenfrequenz des gleichen spielfreien Systems an.

Aus dem letzten Satz können wir ein wichtiges Ergebnis über erzwungene Schüttelschwingungen ableiten: Wenn das System der Abb. 24 durch eine periodische Kraft erregt wird, dann ist Resonanz nicht nur bei einer einzigen Frequenz möglich, sondern bei allen Eigenfrequenzen dieses Systems. Sie wird aber nicht immer eintreten; wenn die Masse z. B. in der Mitte zwischen den Federn steht, wird das System trotz äußerer Erregung so lange nicht schwingen, als die Masse M nicht durch einen Stoß oder dergleichen mit einer der Federn in Berührung kommt. Entgegen dem Verhalten bei harmonischen Schwingungen tritt also hier trotz Resonanz im allgemeinen kein Hochschaukeln aus der Nulllage auf.

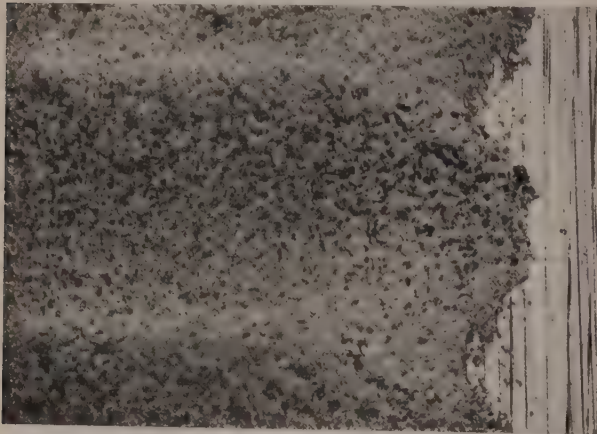


Abb. 25. Infolge der Stoffwanderung ist auf dem Schliffgrund der Rollbahn ein Belag aufgewalzt, in dem bereits muldenförmige Vertiefungen den Beginn der Riffelbildung erkennen lassen. HELLFELD, 135fach vergrößert.

Wenn aber Schwingungen auftreten, bleibt trotz Resonanz auch im verlustfrei angenommenen System die Amplitude endlich; denn mit zunehmender Amplitude wird die Schwingungsdauer kleiner und dadurch wird das System verstimmt und die Resonanz beseitigt. Nur wenn gleichzeitig mit der Amplitude die Frequenz gesteigert wird, kann ein gefährliches Hochschaukeln der Schwingung eintreten.

Erregt man das System der Abb. 24 periodisch mit einer Frequenz, die innerhalb des Bereiches der Eigenschwingungen liegt, dann spielt sich der Vorgang folgendermaßen ab: Durch einen Stoß oder eine ähnliche Ursache wird die Schwingung eingeleitet und kommt mit der erregenden Frequenz in Resonanz. Wegen der Resonanz werden die Amplituden der Schwingung größer; dies dauert aber nicht lange, denn zur größeren Amplitude gehört eine kleinere Schwingungsdauer, das System wird verstimmt und kommt außer Tritt. Dadurch entsteht eine Phasenverschiebung zwischen erregender Kraft und schwingender Masse, die so lange anhält, bis keine Energie mehr von der erregenden Kraft auf die schwingende Masse übertragen wird; die Amplitude sinkt wieder ab, die Schwingungsdauer wird größer und nähert sich wiederum der Resonanz. Nach Erreichen der Resonanz nehmen die Amplituden zunächst weiter ab, die Schwingung kommt dadurch wieder außer Tritt und das Spiel geht in umgekehrter Richtung, wie oben beschrieben, weiter. Mit anderen Worten: Wird ein ungedämpftes System nach Abb. 24 fremd

erregt, dann führt es Schüttelschwingungen aus, die im Mittel die gleiche Frequenz haben wie die erregende Kraft. Die Amplituden, Frequenzen und Phasen sind jedoch Schwebungen unterworfen. Die mittlere Amplitude entspricht der erregenden Frequenz, die mittlere Phasenverschiebung ist Null (da das ungedämpfte System keine Energie aufnimmt) und die mittlere Frequenz ist gleich der Frequenz der erregenden Kraft.

Ist das schwingende System gedämpft, dann treten ebenfalls Schwebungen auf, die aber abklingen. Die mittleren Frequenzen und auch die mittleren Amplituden sind dieselben wie bei den ungedämpften Schwingungen, die mittlere Phase jedoch hängt von der Größe der Dämpfung ab.

Wie bei harmonischen Schwingungen ist auch hier die Phasenbilanz ausschlaggebend dafür, ob sich Schwingungen erregen können oder nicht. Daher können auch hier, genau wie bei harmonischen Schwingungen, nicht nur einfache, sondern auch ganz zahlige Vielfache oder Teile der in Resonanz befindlichen Erregerfrequenzen erzwungene Schwingungen unterhalten; insbesondere können auch periodisch wiederkehrende Stöße solche Schwingungen erregen. Im Falle der Schüttelschwingung ist dies besonders leicht möglich, da hier die Amplituden nur entsprechende Werte anzunehmen brauchen, um das System immer wieder in Resonanz zu bringen. Dem entsprechend gibt es hier nicht nur einzelne Frequenzen, sondern eine Reihe von Frequenzbereichen der erregenden Kraft, die zu erzwungenen Schüttelschwingungen führen können.

3. Wie aus den ersten Riffel die Riffelserien entstehen

Die ersten Riffel entstehen an diskret liegenden Stellen durch die stoßartige Beanspruchung, wenn die Rollen in die belastete Zone einlaufen, indem an diesen Stellen der durch Stoffwanderung entstandene Belag zerstört wird. Dies wurde bereits oben auseinandergesetzt. Die Abb. 25 zeigt, daß die Riffel zunächst tatsächlich nichts anderes darstellen als muldenförmige Vertiefungen in dem Belag auf der Rollbahn. Diese ersten Riffel sind nun die Erreger von immer heftigeren Stößen. Durch diese Stöße werden schließlich die beiden Lagerringe gegeneinander versetzt, so daß die Rollen in der belasteten Zone des Lagers zwischen den Ringen hin- und herspringen und so die vorhin beschriebene Schüttelschwingung ausführen können. Die Stöße der Rollen gegen die Ringe sind nicht vollkommen elastisch. Wegen der Dämpfung des Werkstoffes und besonders anfangs wegen der Dämpfung durch den aufgewalzten Belag, der durch die Stoffwanderung entstanden ist, rasch ab. Durch die Schwingungen, die die Rollen zwischen den Ringen ausführen, werden, von den ersten Riffeln ausgehend, in der Rollrichtung weitere Riffel dadurch erzeugt, daß die Rollen an den Berührungsstellen mit den Ringen den dort vorhandenen Belag zerstören. Auf diese Weise schließen sich an die ersten Riffel in kleinen Abständen weitere, immer schwächer werdende Riffel an, wie dies auf der Abb. 26 zu erkennen ist. Es kann natürlich vorkommen, daß nicht nur eine Gruppe von primären Riffeln entsteht, sondern deren mehrere; dementsprechend ist dann auch die Ausbildung der weiteren

l nicht mehr so einfach zu übersehen. Ein Bei-
dafür gibt die Abb. 26; sie zeigt den Innenring
s Zylinderlagers, an dem die ersten Riffel in
Gruppen aufgetreten sind. Man kann diese
en Riffel der Abb. 26 noch deutlich erkennen,
ohl sich schon viele weitere Riffel ausgebildet
en. Selbst wenn schon die ganze Rollbahn mit
eln bedeckt ist, kann man oft noch die Stellen
ennen, wo die ersten Riffel aufgetreten sind. Bei-
le dafür geben die Abb. 1 und die Abb. 23.
st die Riffelbildung und damit die Korrosion der
bahn schon fortgeschritten, dann werden die
el immer breiter und tiefer. Diese starken Riffel
dann erst recht Anlaß zu starken Schüttel-
vingungen und so kommt es, daß ein Lager sehr
h zerstört wird, wenn die Riffelbildung erst einmal
onnen hat. Doch auch dann noch ist in den
sten Fällen der Einfluß der ursprünglich erregen-
Stöße zu erkennen. Die Abb. 27 und 28 zeigen
i Innenringe, bei denen die Zerstörungen schon
t fortgeschritten sind. Dennoch erkennt man so-
daß die einzelnen Riffel in Gruppen angeordnet
l, die im Abstand der Wälzkörperteilung auf-
ander folgen. Der oben angeführte Satz, daß die
quenz der erzwungenen Schüttelschwingungen
webungen um die erregende Frequenz darstellen,
d durch diese beiden Bilder sehr eindringlich
anschaulicht.

Auf den Abb. 27 und 28 erkennt man ferner, daß
Riffel innerhalb jeder einzelnen Riffelgruppe in
Mitte breiter sind als an den Enden der Gruppe.
sind in der Mitte auch tiefer, was man durch
messen leicht feststellen kann. Man kann diesen
stand aber auch aus den Abbildungen daran
ehen, daß die Laufspur als Ganzes in der Mitte
er Riffelgruppe breiter ist als an deren Enden.
e Rollen sind nämlich an ihren Enden abgerundet;
Eindruck in die Laufbahn erscheint daher um so
ger (und die Laufspur um so breiter), je tiefer
n die Rollen in die Ringe eingearbeitet haben.
r Zusammenhang zwischen Tiefe und Breite der
ffel folgt aus den Besonderheiten der Schüttel-
wung. Wegen der Rollbewegung werden die
llen bei der Schüttelschwingung zwischen den
ngen etwa so bewegt, wie die Abb. 29 es sche-
tisch darstellt. Wenn nun die Rollbahn z. B. des
nenringes so aussieht, wie dies den Abb. 27 und 28
tspricht und wie es die Abb. 29 schematisch und
ertrieben darstellt, dann sieht man aus dem ein-
zeichneten Weg der Rollen ohne weiteres, daß der
stand zweier Auftreffpunkte der Rollen auf die
nge in der Mitte einer Gruppe weiter auseinander
gt, weil dort das Spiel größer ist als an den Enden.

Auf den Ringen der Abb. 27 und 28 ist keine
fgewalzte Schicht mehr zu erkennen. Durch die
arken Schüttelschwingungen der Rollen ist hier aller-
n der Stoffwanderung herrührende Belag bereits
eggeschlagen. Trotzdem geht natürlich die Riffel-
ldung weiter und zwar sehr rasch, weil zu der
stoffwanderung, die jetzt vermutlich durch Funken-
ldung verstärkt wird, mechanische Zerstörungen
eten. Es ist eine bekannte Tatsache, daß sich die
Wälzkörper eines Wälzlagers sehr rasch in die Ringe
nschlagen, wenn sie immer gegen dieselbe Stelle
er Ringe hämmern. Diese Art von Riffelbildung,
r die die Abb. 3 ein Beispiel zeigte, geht auch ohne

äußere Stromquelle vor sich und soll an anderer
Stelle besprochen werden. Die Ringe der Abb. 27
und 28 stellen bereits den Übergang zu dieser Art
der mechanischen Riffelbildung dar.

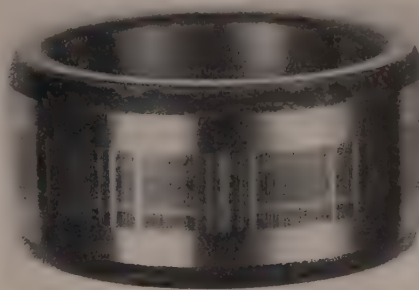


Abb. 26. Riffelbildung auf der Innenring-Rollbahn eines Zylinderlagers NUL 25. Zwei Gruppen primärer Riffel sind besonders deutlich zu sehen.

Eine Eigenart der Riffelbildung durch elektrischen Strom soll noch erwähnt werden. Die Riffel bilden sich meist nicht an beiden Ringen und an den Rollen gleichzeitig aus. In der Mehrzahl der Fälle bilden



Abb. 27. Der Innenring eines Lagers NUL 25. Die Rollbahn zeigt breite, stark eingeschlagene Riffel.

sie sich nur auf einem Ring aus, in einigen Fällen erhalten zuerst nur die Rollen Riffel, wie z. B. beim Nadellager der Abb. 30 und 31. Nach genügend langer Zeit wird natürlich das ganze Lager beschädigt



Abb. 28. Die Rollbahn am Innenring eines Zylinderlagers NUL 25. Die Riffel sind in Gruppen angeordnet, die Länge einer Gruppe entspricht der Rollkörperteilung. Die breiteren Riffel sind tiefer eingeschlagen als die schmäleren.

und dann findet man auf beiden Ringen Riffel. In der Praxis kommt es meist nicht so weit, weil die Lager schon vorher ihre Beschädigung kundtun und ausgebaut werden.

4. Die Schüttelschwingung als notwendige Bedingung der Riffelbildung.

Aus den vorhergehenden Ausführungen folgt, daß die Schüttelschwingungen zur Ausbildung der Riffel notwendig sind. Wenn man daher jede Erschütterung und jeden Stoß vermeidet, dürften sich trotz des korrodierenden Stroms durch das Lager keine Riffel

ausbilden. Um diese Überlegung noch besonders zu prüfen, wurden zwei Versuche angestellt.

Der erste Versuch wurde mit einem Zylinderlager NUL 25 ausgeführt. Um von außen jeden Stoß zu

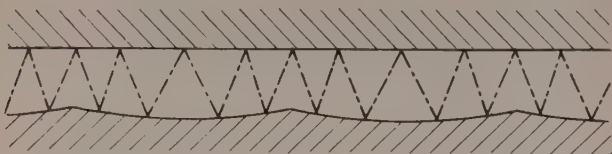


Abb. 29. Der Weg, den die schwingenden Rollen zwischen den Rollbahnen eines bereits beschädigten Lagers nehmen, schematisch dargestellt.

vermeiden, wurde die Welle *W* der Abb. 4 in Gleitlagern gelagert und die Bedingungen so gewählt, daß in diesen Lagern reine Flüssigkeitsreibung vorherrschte. Die Welle wurde durch einen endlosen

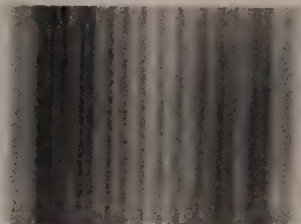


Abb. 30. Das Mittelstück einer Nadelrolle aus dem Lager der Abb. 31, 15fach vergrößert. Man erkennt viele, schmale Riffel.

Gummikeilriemen angetrieben. Als Versuchslager wurde ein Lager gewählt, das im eingebauten Zustand praktisch spielfrei war und das praktisch schlagfrei lief. Im spielfreien Lager berühren alle

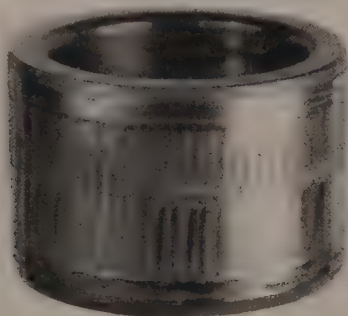


Abb. 31. Der Innenring eines Nadellagers NA 25, nach 67 Laufstunden. Durch dieses Lager floß 4-A-Gleichstrom, der Innenring war Anode und lief mit 2490 Umdrehungen in der Minute um. Der schräge Verlauf der Riffel zeigt, daß sich die Nadeln schräg zur Lagerachse gestellt hatten. (Daß die Riffel auf der einen Hälfte der Rollbahn stärker ausgebildet sind als auf der anderen hat besondere Gründe, die hier nicht interessieren.)

Rollen gleichzeitig beide Ringe; dadurch werden die Stöße, die sonst beim Einlaufen der Rollen in die belastete Zone auftreten, fast vollständig vermieden. Somit fehlten bei diesem Versuch die beiden wichtigsten Bedingungen zur Ausbildung von Schüttelschwingungen: das Spiel und die anregenden Stöße. Um noch ein übriges zur Vermeidung von Stößen zu tun, wurde der Versuch mit nur 1000 Umdrehungen in der Minute ausgeführt.

Durch das Lager wurde 50-Hz-Wechselstrom von 4 A geleitet. Bei dieser Stromart und -stärke hatten die Lager sonst nach 10–40 Stunden so starke Riffel, daß sie als bereits zerstört ausgebaut werden mußten. Hier mußte das Versuchslager 350 Stunden

lang laufen, ehe das charakteristische Geräusch, das die Riffelbildung kundtut, einigermaßen deutlich zu hören war. Nach 350 Stunden wurde das Lager ausgebaut. Die Ringe zeigten einen starken Belag auf nur sehr feine Riffel. Es fehlte eben die Anregung zu stärkeren Schüttelschwingungen. Ein weiteres interessantes Merkmal zeigte der Außenring des Lagers: Der Belag erstreckte sich hier über die gesamte Rollbahn; an einer Stelle zeigten sich bereits Riffel, diesmal aber nicht in der belasteten, sondern in der unbelasteten Zone. Im ursprünglich spielfreien Lager entsteht durch die Stoffwanderung schließlich das Spiel und zwar zuerst in der unbelasteten Zone. Dort sind also zuerst die Bedingungen gegeben, die eine Schüttelschwingung ermöglichen.

Der zweite Versuch wurde mit einem Nadellager NA 25 ausgeführt. Das Lager wurde in der Anordnung der Abb. 4 geprüft. Die Hilfslager *A* waren in diesem Versuch Wälzlager. Diesem Versuch lag folgende Überlegung zugrunde: Im Nadellager sind viel mehr Wälzkörper enthalten als im Zylinderlager mit Käfig. Daher tragen in der belasteten Zone jeweils auch mehr Wälzkörper und dementsprechend werden die Stöße, die beim Einlaufen der Rollen in die belastete Zone entstehen, geringer sein. Bei einem Nadellager dürfte die Riffelbildung demnach erst später eintreten als beim Zylinderlager.

Das Lager war, wie auch alle anderen Lager, die in der gleichen Anordnung untersucht wurden, mit 8 kg belastet. Es wurde 4-A-Gleichstrom hindurchgeleitet, der Innenring war Anode. Unter denselben Bedingungen waren vorher 5 Zylinderlager NUL 25 untersucht worden, deren Innenringe schon nach 10 Laufstunden so zerstört waren, wie die Abb. 28 zeigt. Das Nadellager hingegen zeigte erst nach 30 Laufstunden die ersten schwachen Riffel und zwar nicht auf den Ringen, sondern auf den Rollen. Nach weiteren 20 Laufstunden waren die Riffel auf den Nadeln schon sehr deutlich zu sehen (s. Abb. 30). Die Ringe zeigten jedoch nur ganz schwache Spuren von Riffelbildung. Nach weiteren 15 Stunden wurde der Lauf des Lagers unruhig, und 2 Stunden später, also nach insgesamt 67 Laufstunden, war das Lager bereits 300° warm und vollständig unbrauchbar geworden. Wie die Abb. 31 zeigt, hatte der Innenring schließlich doch Riffel davongetragen. Der Außenring zeigte nur Spuren einer Riffelbildung.

Der Versuch brachte das erwartete Ergebnis. Das Nadellager, bei dem die Schwingungserregung geringer ist als beim Zylinderlager mit Käfig, ist gegen Riffelbildung widerstandsfähiger. Aus diesem Grund und weil Nadellager an Stellen, wo Stromdurchgang möglich ist, weniger verwendet werden scheint in der Praxis bei diesen Lagern bisher keine Riffelbildung beobachtet worden zu sein.

Zusammenfassung.

Fließt durch ein Wälzlager elektrischer Strom, dann tritt zwischen den Ringen und den Rollkörpern die aus der Kontaktlehre bekannte Stoffwanderung auf. Als Folge davon wird auf die Rollbahnen ein Belag aufgewalzt, der aus Eisenoxiden und Schmierstoffresten besteht. Dieser Belag haftet fest auf den Rollbahnen, hat jedoch eine geringe Härte.

in einem Gleitlager wird die Welle vom Schmiergetragen. Der Schmierfilm wird zwar immer aber durchaus stetig gebildet. Im Wälzlager die Welle (der Innenring) von den Rollkörpern gen. Es kommen immer andere Wälzkörper Tragen; da aber nur eine kleine Zahl von Wälzkörpern in einem Wälzlager enthalten ist und da nur ein Drittel aller Wälzkörper gleichzeitig die Welle (den Innenring) tragen, erfolgt die Kraftübertragung von einem Ring zum anderen stoßartig. Gleitlager wirkt der Schmierfilm nicht schwingungserregend sondern dämpfend, im Wälzlager werden die Wälzkörper nicht schwingungsdämpfend sondern schwingungserregend. Die Stöße, die beim Einlaufen der Wälzkörper in die belastete Zone des Lagers entstehen, veranlassen die ersten riffelartigen Eindrücke in den Lauf der Rollbahn. Diese Eindrücke werden durch die Schwingungserregern, und Ursache und Wirkung verstärken sich so lange, bis Schüttelschwingungen auftreten, was durch das praktisch immer vorhandene Lagerspiel noch erleichtert wird. Damit in Wälzlagern, die von elektrischem Strom durchflossen werden, Riffelbildung auftreten kann, müssen demnach zwei Bedingungen erfüllt sein: Es muß sich auf den Rollbahnen ein leicht zerstörbarer Schmierfilm bilden und es müssen Schwingungen auftreten. Das Wälzlager selbst als Schwingungserreger wirkt, genügt es praktisch, daß die erste Bedingung erfüllt wird. Stoffwanderung tritt bei Gleich- und Wechselstrom auf, daher ist Riffelbildung bei beiden Stromarten zu erwarten und tritt auch tatsächlich auf. Gleich- und Wechselstrom auf, im Gegensatz zu den verschiedenen Angaben im Schrifttum [9], [12]. Wenn man die Riffelbildung vermeiden will, dann ist es dazu nur einen Weg: Man muß die Bildung des leicht zerstörbaren Belages auf den Rollbahnen verhindern, man muß also dem elektrischen Strom

den Weg durch das Lager versperren. Dazu genügt es nicht, das Lager mit einem isolierenden Schmiermittel zu schmieren, wie dies z. B. MAURIN [12] vorschlägt, da die Stromleitung im Wälzlager entgegen seiner Ansicht nicht elektrolytischer Art ist. Es genügt auch nicht, das Wälzlager durch einen Schleifkontakt zu überbrücken. Die Frittschlußspannung eines Schleifkontaktes liegt auch bei Schleifringen aus Kupfer bei 1,5 V, die Frittschlußspannung eines Wälzlagers jedoch bei 0,7 V; es wird also trotz des Schleifkontaktes ein großer Teil des gesamten Stromes durch das Lager fließen.

Praktisch dürfte sich ein Wälzlager vor Stromdurchgang am einfachsten dadurch schützen lassen, daß man zwischen einem Ring (meistens wird es der Außenring sein) und dem anschließenden Bauteil einen isolierenden Zwischenring anordnet. In vielen Fällen kann dieser Ring aus Preßstoff bestehen, auch Gummi wird sich manchmal eignen; soll er aus Metall sein, dann ist oxydiertes Aluminium am Platz.

- Literatur.** [1] ALMEN, J. O.: Mech. Ing. **59**, 415 (1937). — [2] BERNDT, G.: Z. Instrumentenkde. **48**, 422 (1928). — [3] DUFFING, G.: Erzwungene Schwingungen bei veränderlicher Eigenfrequenz und ihre technische Bedeutung. Braunschweig 1918. — [4] EHRT, M.: Maschinenschaden **16**, 37 (1939). — [5] EHRT, M. u. G. KÜHNELT: Maschinenschaden **19**, 71 (1942). — [6] EVANS, U. R.: Korrosion, Passivität und Oberflächenschutz von Metallen. Berlin 1939. — [7] HERTZ, H.: Über die Berührung fester elastischer Körper und über die Härte. Ges. Werke, Bd. I, S. 186. Leipzig 1895. — [8] HOLM, R.: Die technische Physik der elektrischen Kontakte. Berlin 1941. — [9] JÜRGENSMAYER, W.: Die Wälzlager, S. 436. Berlin 1937. — [10] KOHAUT, A.: Z. angew. Phys. **1**, 165 (1948). — [11] KOHAUT, A.: Feinmech. u. Präz. **50**, 17 (1942). — [12] MAURIN, A. J.: J. Soc. Ing. Autom. **15**, 267 (1942). — [13] PEARSON, G. L.: Phys. Rev. **56**, 471 (1939). — [14] SCHMALTZ, G.: Technische Oberflächenkunde. Berlin 1936. — [15] STRIBECK, R.: Z. Ver. dtsh. Ing. **45**, 121 (1901). — [16] TEN BOSCH, M.: Vorlesungen über Maschinenelemente, S. 288. Berlin 1940. — [17] WICHERT, A.: VDI-Forsch.-Heft **266** (1924).

Untersuchungen über die Wärmeleitung kältetechnischer Salzlösungen*.

Von WALTER RAU.

(Mitteilung aus dem Laboratorium für Technische Physik der Technischen Hochschule München.)

Mit 13 Textabbildungen.

(Eingegangen am 16. Dezember 1947.)

Die Bestimmung der Wärmeleitfähigkeit gewisser, der Kältetechnik verwendeter Salzlösungen, sog. Kältsolen, ist für die Projektierung und den Betrieb von Kältemaschinen von Bedeutung. Es handelt sich dabei in der Hauptsache um wäßrige Lösungen von NaCl , KCl , MgCl_2 , zuweilen auch CaCl_2 und NH_4Cl , die im Handel fertig zu beziehende Lösungen verschiedener Bezeichnung, die außer obigen und anderen Salzen Zusätze an Stoffen zur Verhinderung von Korrosion in den Maschinenaggregaten enthalten. Die vorliegenden Untersuchungen der Wärmeleitung an Kältsolen bilden die Fortsetzung von Messungen von E. MEYER [1]. Es sollten neben einer Weiterführung der Meßmethode in experimenteller Beziehung die Wärmeleitwerte für Lösungskonzentrationen unter- und oberhalb des von MEYER untersuchten

Konzentrationsgebietes bestimmt, sowie die für die Kältetechnik besonders wichtigen Leitwerte von Kochsalzlösungen ermittelt werden. Darüber hinaus wurden Messungen an Chlorkaliumlösungen durchgeführt und der untersuchte Temperaturbereich bis $+20^\circ\text{C}$ erweitert.

Meßverfahren.

Es wurde ein von MEYER [1] und HAMMANN [2] ausführlich beschriebenes Meßverfahren verwendet. Eine Kritik der Brauchbarkeit des Verfahrens gab HAMMANN.

Abb. 1 zeigt die Meßkammer. Zwischen zwei planparallelen Kupferplatten, die obere als Heizplatte (H), die untere als Kühlplatte (K) ausgebildet, befindet sich ein zylindrischer Meßraum (R) zur Aufnahme der Meßflüssigkeit. Dieser ist gegen einen angrenzenden Vakuumraum (V) nach oben durch die genannte Heizplatte, nach der Seite durch einen

* Dissertation der Technischen Hochschule München 1941 in gekürzter Fassung.

dünnen Neusilberblechmantel (M) abgeschlossen. Es wird damit erreicht, daß sich bei Beschickung der Heizplatte mit einem zeitlich konstanten elektrischen Strom und bei einer durch ein ringsum anschließendes Flüssigkeitsbad konstant gehaltenen Temperatur der Kühlplatte ein zeitlich konstanter Wärmestrom von oben nach unten einstellt. Durch Wahl der oberen

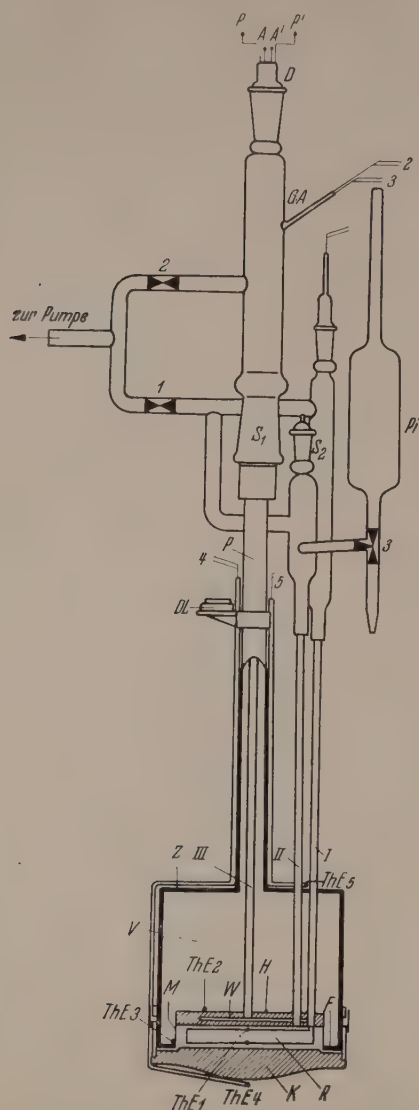


Abb. 1. Die Meßkammer. (Bedeutung der einzelnen Buchstaben und Ziffern siehe Text.)

Platte als Heiz-, der unteren als Kühlplatte wird erreicht, daß sich bei vollkommen waagrechter Ausrichtung in der Flüssigkeit keine Wärmekonvektion einstellen und aufrechterhalten kann, wenn dabei ein Wärmeaustausch nach der Seite unterbunden wird, was durch den umgebenden Vakuummantel erreicht wird. Die Wärmeübertragung findet somit ausschließlich durch Leitung statt. Eine Abstrahlung von Wärme nach der Seite ist bei den praktisch vorkommenden Temperaturdifferenzen so gering, daß man davon absehen kann. Gemessen wird bei stationärem Temperaturfeld, bis zu dessen Eintreten genügend lange gewartet werden muß. Hat sich der stationäre Zustand eingestellt, so sind in sehr großer Annäherung Ebenen parallel zu Heiz- und Kühlplatte Isothermenflächen, die sich auch über den anschließenden Blechmantel erstrecken. An den Grenzflächen

der Flüssigkeit können Temperatursprünge auftreten verursacht durch anhaftende Gasbläschen. Da jedoch der Temperaturabfall innerhalb der Flüssigkeitsschicht festgestellt wird, treten dadurch keine Meßfehler auf. Zur Feststellung des Temperaturgradienten in Richtung des Wärmestromes wird ein Thermoelement ($ThE\ 1$) in den Meßraum (R) gebracht. Dieses ist als Differentialthermoelement ausgebildet, dessen rechteckige Form so gewählt ist, daß die waagerechten Seiten auf möglichst langem Weg parallel zu den Heiz- und Kühlplatten verlaufen. Die beiden Lötstellen liegen übereinander. Ist d der Abstand der Lötstellen, Q_L die durch die Flüssigkeit in der Zeiteinheit fließende Wärmemenge, F der Querschnitt der Flüssigkeitsschicht, Δt die mit Hilfe des Differentialthermoelements ermittelte Temperaturdifferenz zwischen den Lötstellen, so ergibt sich als Wärmeleitfähigkeit λ der Flüssigkeit der Wert

$$\lambda = \frac{Q_L d}{F \Delta t}$$

Der Wert für λ stellt einen Mittelwert der Wärmeleitfähigkeit der einzelnen Flüssigkeitsschichten zwischen Heizplatte und Kühlplatte dar. Wenn λ linear von der Temperatur der Substanz abhängt, was bei den von uns untersuchten Lösungen angenommen nähert zutrifft, dann erhält man $\lambda(t + \Delta t/2)$, wenn t die Temperatur der unteren Lötstelle ist. Beim Einbau des Differentialthermoelements wurden dessen beide Lötstellen in eine zur Mittelebene des Meßraumes symmetrische Lage gebracht; es konnte daher als Bezugstemperatur für λ anstelle der Mitteltemperatur zwischen den beiden Lötstellen der Mittelwert der Temperaturen von Heiz- und Kühlplatte gewählt werden.

Die Meßkammer hatte einen äußeren Durchmesser von 80 mm und eine Höhe von 75 mm, der Meßraum R einen Innendurchmesser von 60 mm. Der Abstand zwischen Heizplatte H und Kühlplatte K betrug 10,5 mm. Meßraum R wurde zum Schutze gegen Korrosion vernickelt. Die Kühlplatte K konnte nach unten abgenommen werden. Die Dicke des Mantels M betrug 0,1 mm. Der Anteil an der sekundlich zugeführten Wärmemenge, welcher über den Mantel M zur Kühlplatte abfloß, war etwa 35%. Ein Metallring F bildete den Abschluß des Vakuumraumes V nach unten.

Da die gemessenen Salzlösungen elektrolytisch gut leitend sind, mußte das in die Meßflüssigkeit eintauchende Differentialthermoelement mit großer Sorgfalt isoliert werden. MEYER verwandte zur Isolierung Lacke bei verschiedenen Behandlungsverfahren, konnte jedoch nicht erreichen, daß die so behandelten Thermolemente über lange Zeit den korrodierenden Einfluß der Salzlösungen standhielten. Deshalb wurden die Thermodrähte in eine dünnwandige Glaskapillare eingebracht. Dies geschah in folgender Weise: Ein blanker Konstantandraht von 0,15 mm Dicke wurde in ein Stück waagrecht eingespanntes Glasrohr gebracht und dieses in der Bunsenflamme bis zum Weichwerden erhitzt. Dann wurde das Glasrohr mitsamt dem darin befindlichen Draht zu einer Kapillare ausgezogen. Die Beobachtung im Mikroskop ergab, daß sich die Kapillarwandung allseitig an den Draht anlegte. Darauf wurde die Kapillare mit dem darin enthaltenen Draht an einer Schablone mit Hilfe einer an einer Glasrohrspitze brennenden kleinen Flamme in die gewünschte rechteckige Form der Meßschleife gebracht, hierauf das eine Ende des beidseitig herausragenden eingelegten Drahtes mit dem vorbereiteten Thermolementendraht verschweißt, und dieser durch vorsichtiges Ziehen am anderen Ende des Drahtes in die rechteckig gebogene Kapillarenschleife eingezogen, bis die beiden Lötstellen übereinander zu liegen kamen. Als Thermodrähte wurden Drähte aus Manganin und Konstantan von je 0,05 mm Dicke verwendet. Durch das nachträgliche Einbringen des Thermodrähtes wurde die Gefahr einer thermischen Strukturveränderung umgangen, die zu befürchten gewesen wäre, wenn das Zurechtbiegen der Meßschleife erst

dem Einziehen des Thermodrahtes erfolgt wäre. Zum β wurde der Zwischenraum zwischen Thermodraht und Larinnenwandung des besseren Wärmekontakts wegen Paraffinöl ausgefüllt. Das so gefertigte Thermoelement 1 hatte eine Dicke von 0,4 mm, die Wandstärke der Kapillare war 0,13 mm. Die Breite der Meßschleife betrug 5 cm, die beiden Lötstellen hatten einen Abstand von 1 cm.

Eine überschlägige Rechnung zeigte, war die Wärmeleitung der Glaskapillare mit dem eingeschlossenen Thermoelement in der Größenordnung der Leitzahl der gemessenen Substanz, so daß ohne großen Fehler angenommen werden konnte, daß sich im stationären Zustand die Ebenen gleicher Temperatur auch über das Differentialthermoelement erstreckten. Die beschriebene Herstellungsweise des in die Flüssigkeit frei hineinragenden Differentialthermoelements hatte den Vorzug mit sich, daß die Glasstützen entfielen, bisher zum Ausspannen der Thermodrähte notwendig war und eine gewisse Störung des Temperaturfeldes in der Meßflüssigkeit darstellten. Weiterhin hat sich die Bestimmung des Lötstellenabstandes als sehr bequem erwiesen. Der Abstand konnte vor Einbau der Meßschleife mit Hilfe eines Zeißschen Komparators auf weniger als 1‰ genau gemessen werden.

Die Bestimmung der Temperaturen der Heizplatte und der Kühlplatte geschah mittels der Thermoelemente *ThE 2* und *ThE 4*. Thermoelement *ThE 2* war an der Heizplatte, aus Abb. 1 zu ersehen, angelötet. Thermoelement *ThE 4* an der Unterseite der Kühlplatte angebracht. Vorversuche ergaben, daß die Heizplatte an allen Stellen gleiche Temperatur annahm. Ein weiteres Thermoelement *ThE 3* wurde am unteren Rand des Mantels *M* angelötet. Die Anzeigen von *ThE 2* und *ThE 3* dienten neben der Feststellung des Temperaturwertes an der betreffenden Stelle der Bestimmung desjenigen Anteils der Heizleistung, welcher auf dem Wege als durch die Meßflüssigkeit von der Heizplatte wegfloß. Die beiden Elemente *ThE 2* und *ThE 3* waren auf der Vakuumseite angebracht, um die Zuleitungen längeren Strecken längs Linien konstanter Temperatur verlegen zu können, ohne das Temperaturfeld im Meßraum zu stören, was notwendig war, um Temperaturmeßfehler zu schließen. Gleichzeitig konnten damit Isolationsproblemen umgangen werden. Ein weiteres Thermoelement *ThE 5* war an der in Abb. 1 eingezeichneten Stelle angelötet und diente der Überwachung des in der Meßkammer befindlichen Flüssigkeitsbades. Die Anzeigen von *ThE 5* entsprachen bei den Messungen denen von *ThE 4*. Alle Thermoelemente waren aus Manganin- und Konstantandrähten von 0,05 mm Dicke gefertigt. Die Wärmeleitung entlang der Thermoelementdrähte war in allen Fällen vernachlässigbar klein. In die Heizplatte war eine Heizwicklung aus Manganindraht eingelegt. Sie war nach oben und unten gegen den Plattenkörper durch dünne Glimmerblätter isoliert. Ihr Widerstand betrug bei 0°C 93,5 Ω . Die Enden der Heizspirale führten Stromzuführungsdrähte (*A—A'*) und Potentialdrähte (*P—P'*). Die Dicke der Stromzuführungsdrähte aus Kupfer wurden nach Angaben von MEISSNER [3] so berechnet, daß bei einer Länge von 50 cm, einer Temperatur von +20°C am oberen, -20°C am unteren Ende der Stromzuführungen und einem Heizstrom von 0,1 A die der Heizplatte zugeführte sekundäre Wärmemenge ein Minimum war. Der Drahtdurchmesser ergab sich zu 0,2 mm.

Zum Zwecke des Auspumpens des Vakuumraumes *V* war an den Deckel *Z* der Meßkammer ein Rohr *P* angesetzt und dessen oberem Ende ein Glasschliff *S₁* eingekittet, der in Anschluß an den gläsernen Vakuumteil vermittelte. Eine 3stufige Hg-Diffusionspumpe sorgte für ein ständiges Vakuum von $< 10^{-3}$ Torr. Konzentrisch in dem Rohr *P* war die Röhre *III* als Schutzrohr für die Zuleitungsdrähte zur Heizwicklung eingesetzt. Dieses war nur bis zur Höhe Glasschliffs *S₁* geführt, um in ihm eine zusätzliche Wärmeleitung zu verhindern. Die 4 Zuleitungen zur Heizplatte waren über Lötstellen in die Thermoelemente *ThE 2* und *ThE 3* traten durch Lötlaschen oberhalb Schliff *S₁* angesetzten dünnen Glasansatz *GA*, in den sie vakuumdicht eingekittet waren. Die beiden Röhren *I* und *II* durchsetzten den Vakuumraum *V* und waren durch entsprechenden Bohrungen in der Heizplatte und im Deckel *Z* vakuumdicht eingelötet.

Rohr *II* diente dem Füllen und Entleeren des Meßraumes, Rohr *I* enthielt die Zuleitungen zum Thermoelement *ThE 1*.

Das Füllrohr *II* trug an seinem oberen Ende einen Schliff *S₂*, durch den eine dünne Glasröhre zum Entleeren und eine elektrische Sonde zur genauen Messung der Flüssigkeitshöhe bis zum Grunde des Meßraums *R* eingeführt werden konnte, sowie eine Pipette *Pi* mit Dreiweghahn *3* zur Aufnahme der einzufüllenden Lösungen. Alle 3 Röhren *I—III* waren aus Neusilber. In den Röhren *I* und *II* fand bei der Messung ein konstanter Wärmeabfluß von der Heizplatte zum Deckel *Z* statt. Dieser betrug nach Berechnung etwa 5% der gemessenen Heizleistung und wurde in einer vorangegangenen Leermessung zusammen mit den übrigen Leerverlusten experimentell bestimmt.

Schließlich war seitlich an dem Rohr *P* eine Dosenlibelle *DL* angebracht, die eine genau waagrechte Einjustierung der Meßkammer gestattete.

Zur Einstellung und Konstanthaltung der Temperatur der Kühlplatte tauchte die ganze Meßkammer in ein Flüssigkeitsbad (3 Liter Äthylalkohol) mit Rührwerk. Das Flüssigkeitsbad war zu verwenden in einem Temperaturbereich von etwa +20 bis -70°C. Zur Regulierung der Temperatur des Bades wurde ein Thermostat nach HENNING [4], [5] verwendet, der gestattete, diese während einiger Stunden auf $\pm 0,02^\circ$ konstant zu halten. Als Kühlmittel diente flüssiger Sauerstoff, der in genau regelbarer Menge in eine den Rührer konzentrisch umgebende gläserne Rohrschleife eintropfte.

Zur Feinregulierung der Badtemperatur und zur schnelleren Wiederaufheizung nach erfolgter Abkühlung war außerdem eine kleine Zusatzheizung in das Bad eingebaut. Die Badtemperatur wurde mittels des Thermoelementes *ThE 6* und eines Platinwiderstandsthermometers *Pt* gemessen.

Die Thermokräfte der Elemente *ThE 1* bis *ThE 6* wurden mittels eines Diesselhorstschen Kompensationsapparates bestimmt. Es konnte mit der Meßanordnung bei angeschlossenem Thermoelement *ThE 1* noch eine Spannung von $5 \cdot 10^{-8}$ V abgelesen werden, was einer Temperaturdifferenz an den beiden Lötstellen von *ThE 1* von etwa 10^{-8}° entspricht. Die Meßgenauigkeit war bei den andern Thermoelementen etwa ebenso groß. Vor Einbau der Thermoelemente wurden die verwendeten Thermodrähte nach W. MEISSNER [6] auf thermoelektrische Homogenität geprüft. Dies geschah in der Weise, daß mit Hilfe einer besonderen Vorrichtung die Thermodrähte durch flüssigen Sauerstoff gezogen wurden, wobei ihre Enden dauernd an einem Galvanometer lagen, das bei Inhomogenität einen Spannungsausgang anzeigte. Die ausgewählten Thermodrähte erwiesen sich als brauchbar.

Die Eichung der Thermoelemente erfolgte nach deren Einbau unter Verwendung des oben genannten Thermostaten durch Vergleich mit einem gleichfalls eingebauten Platinwiderstandsthermometer.

Die vorangehende Eichung des Platinthermometers wurde nach den dabei zu beachtenden Regeln an den gesetzlich vorgeschriebenen Fixpunkten vorgenommen [7]. Die für das Widerstandsthermometer charakteristischen Konstanten α (mittlerer Temperaturkoeffizient zwischen 0 und 100°C) und δ [8] wurden durch Eichung am Eispunkt, Wassersiedepunkt und Schwefelsiedepunkt gewonnen. ($100\alpha = 0,3860$, $\delta = 1,547$.)

Zur Aufstellung einer Eichentabelle für Temperaturen unter 0°C wurden die hierzu veröffentlichten Richtwerte der PTR [9] benützt. Diese Richtwerte wurden aus Messungen an einem Pt-Widerstandsthermometer von hohem Reinheitsgrad gewonnen. Zur Bestimmung der Abweichungen der Anzeige des eigenen Thermometers von den Vergleichswerten wurde dieses am Sauerstoffpunkt geeicht und daraus die anzubringenden Korrekturen ermittelt. Obwohl das Platin des bei den Messungen verwendeten

Platinthermometers nicht von höchstem Reinheitsgrad war, reichte die mit ihm erzielte Meßgenauigkeit für die Untersuchungen vollkommen aus.

Vor Beginn der eigentlichen Messungen mußte zunächst die Leerverlustleistung der Kammer bestimmt werden. Die Wärmemenge, die der Heizplatte durch die Heizwicklung zugeführt wurde und zu der noch der durch die Zuleitung zu der Heizplatte gelangende Wärmeanteil zu addieren war, wanderte zum Teil über den Neusilbermantel und die beiden Rohre *I* und *II* zur Kühlplatte *K* bzw. zum Deckel der Meßkammer, zu einem kleinen Teil fand auch eine Wärmeübertragung durch Strahlung statt. Eine überschlägige Berechnung dieser so übertragenen Anteile der gesamten Heizleistung ergab sich als Leerverlustleistung zu 40 %, was durch die nachträglichen Messungen bestätigt wurde.

Die geringfügige Übertragung von Wärme durch Strahlung zwischen Heiz- und Kühlplatte wurde bei der Bestimmung der Leerverluste rechnerisch berücksichtigt. Die Heizleistung wurde bei der Leermessung so beschränkt, daß zwischen Heiz- und Kühlplatte ungefähr dieselbe Temperaturdifferenz wie bei den nachfolgenden Messungen auftrat. Diese betrug im Durchschnitt 3,5°. Wegen des linearen Zusammenhanges zwischen dieser Temperaturdifferenz (bei stets derselben Temperatur des Flüssigkeitsbades) und dem Leerverlust einerseits, der Wärmeleitzahl von Neusilber und der Temperatur andererseits, konnte der Leerverlust bei den eigentlichen Messungen aus den Ergebnissen der Leerversuche genau berechnet werden.

Die Meßlösungen mit Ausnahme der Reinhartins-Lösungen wurden vor dem Einfüllen bei vermindertem Druck durch Auskochen von gelöster Luft befreit und darauf ihre Konzentration mittels eines Pyknometers bestimmt.

Die Konzentration der Lösung wurde nach der Entnahme noch einmal bestimmt, da eine Änderung durch zurückbleibende kleine Mengen der vorher untersuchten Lösung möglich war. Die Unterschiede in den Lösungsdichten waren jedoch in allen Fällen sehr gering. Bei Beginn einer neuen Meßreihe an einer anderen Lösungsreihe wurde der Meßraum durch öftmaliges Ausspülen mit destilliertem Wasser von möglichen Rückständen befreit.

Das untersuchte Gebiet.

Die Messungen an den genannten Salzlösungen dienten der Untersuchung der Abhängigkeit der Wärmeleitfähigkeit einerseits von der Temperatur, andererseits von der Lösungskonzentration. Für kältetechnische Fragen sind Temperaturen von etwa +20° C bis zur Abkühlungsgrenze und Konzentrationen innerhalb des gesamten Löslichkeitsgebiets zwischen diesen Temperaturgrenzen von Interesse. MEYER hat nur ein Teilgebiet untersucht. Es fehlten vor allem Angaben für Konzentrationen höher als die Konzentration des kryohydratischen Punktes, ferner Meßergebnisse für Lösungen sehr geringer Konzentration und Messungen für Temperaturen zwischen 0 und +20° C. Da zwischen Heiz- und Kühlplatte für die Messung ein Temperaturunterschied von einigen Grad aufrechterhalten werden mußte, die Kühlplattentemperatur aber höchstens bis zu derjenigen Grenztemperatur gesenkt werden konnte, bei der eine der beiden Lösungskomponenten in fester

Form ausfiel, lag die tiefste mittlere Meßtemperatur etwas (~2°) über der Grenztemperatur. Es konnte deshalb gesättigte Lösungen zwar nicht direkt untersucht werden, doch erscheint die Bestimmung ihrer Wärmeleitzahlen durch Extrapolation gerechtfertigt. In den nachfolgenden Abb. 2—7 sind außer den Diagrammen mit den Meßergebnissen auch die Löslichkeitskurven mit den gemessenen Lösungskonzentrationen aufgezeichnet, so daß daraus das jeweils untersuchte Gebiet ersehen werden kann.

Ergebnisse.

Es wurden wäßrige Lösungen von CaCl₂, MgCl₂, KCl, NaCl, NH₄Cl und Reinhartins-Kühlsolen untersucht. Gemessen wurde der Reihe nach jeweils eine bestimmte Konzentration bei stufenweise verringerten Temperaturen. Die Ergebnisse der Messungen sind in den Tabellen 1—6 aufgeführt und in den Abb. 2—7 graphisch dargestellt. Diese Diagramme enthalten die Wärmeleitzahl λ als Funktion der mittleren Temperatur der Lösung, wobei die konstant gehaltene Konzentration *c* den Parameter bildet. Die folgenden Abb. 8—13 sind durch Umzeichnung aus den ersteren gewonnen. Sie stellen die Beziehung zwischen der Wärmeleitzahl λ und der Lösungskonzentration *c* dar, wobei die Lösungstemperatur Parameter ist. Die Kurven in den Abb. 8—13 sind somit Isothermen. Die Lösungskonzentration ist durch die Dichte bei 20° C, in Prozent und durch die Anzahl von Gramm wasserfreiem Salz in 1000 g Lösung angegeben. Die Bezeichnung Prozent bedeutet dabei den Gehalt an wasserfreiem Salz bezogen auf 100 g Lösung.

Wie Abb. 2—7 zeigen, nimmt bei gleichbleibender Lösungskonzentration die Wärmeleitfähigkeit linear mit steigender Temperatur zu. Es gilt demgemäß für die Wärmeleitzahl bei der Temperatur *t* (in °C)

$$\lambda_t = \lambda_{0,c} (1 + \alpha_c t).$$

Dabei ist $\lambda_{0,c}$ die Wärmeleitzahl der betreffenden Lösung bei 0° C und der Konzentration *c*, α_c ein von der Konzentration abhängiger Temperaturkoeffizient. Die Abhängigkeit von α_c von der Konzentration *c* läßt sich nicht in einfacher Form ausdrücken, es wurde daher von der Aufstellung einer empirischen Formel Abstand genommen.

Die Linien konstanter Konzentration in den Abb. 2—7 wurden bis zu den Abkühlungsgrenzen verlängert. Die Grenztemperaturen sind durch einen senkrechten Strich gekennzeichnet. Besonders bemerkenswert ist der Verlauf der Isothermen in den Abb. 8—13. Sie fallen mit zunehmender Konzentration im allgemeinen zunächst etwa linear bis in die Nähe der Konzentration des kryohydratischen Punktes *A* ab. Eine Ausnahme bilden die Kochsalzlösungen, deren Isothermen zunächst linear bis zu einem Maximum bei 16—18% ansteigen und dann steil nach unten abfallen. Auch die Reinhartins-Lösungen¹ zeigen zum Teil einen mit der Konzentration zunächst zunehmenden Leitwert.

In der Nähe des kryohydratischen Punktes fallen bei einem Teil der untersuchten Lösungen die Isothermen mehr oder minder stark ab. Bei allen Lösungen mit Ausnahme der Reinhartins-Solen steigen sie bei Überschreitung der kryohydratischen Konzentration sprunghaft auf einen höheren Wert an, um

¹ Lieferfirma: Kühlsole-Werk Fritz Werner, Leipzig C 1.

edl
s Grad

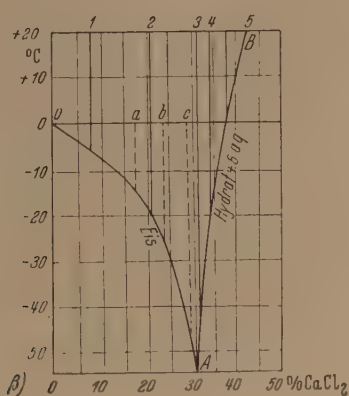
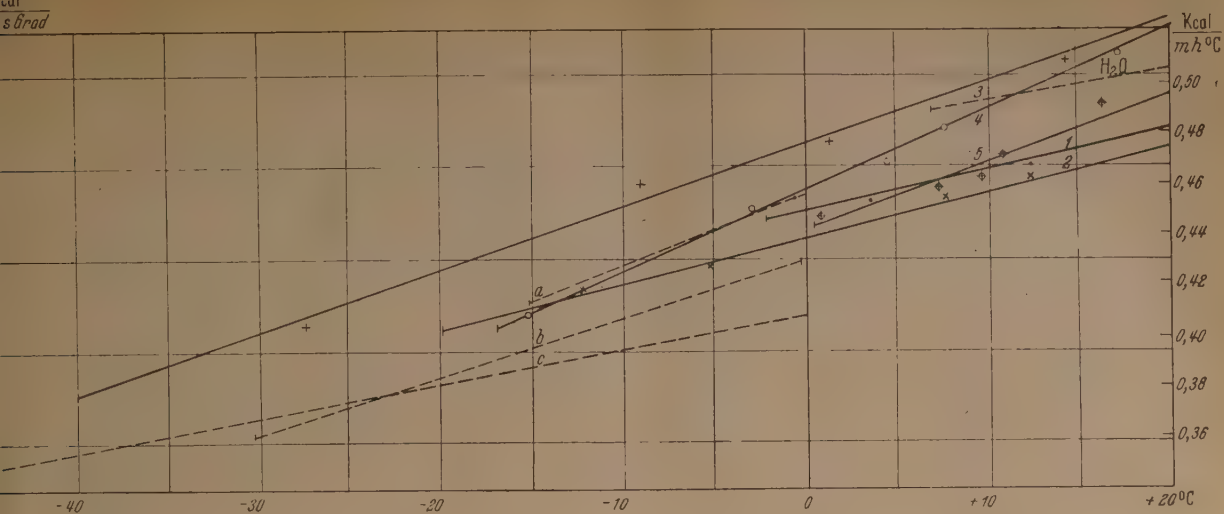


Abb. 2 α u. β. α Wärmeleitzahl-Temperatur-Diagramm für konstante Konzentrationen für CaCl_2 - H_2O -Lösungen. β Löslichkeitskurve für CaCl_2 - H_2O -Lösungen. Die Bezifferung der Kurven in Abb. α bezieht sich auf die im Diagramm β besonders markierten Konzentrationswerte. a, b, c = Ergebnisse von E. MEYER.

Grad

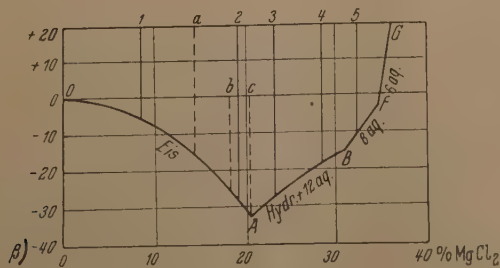
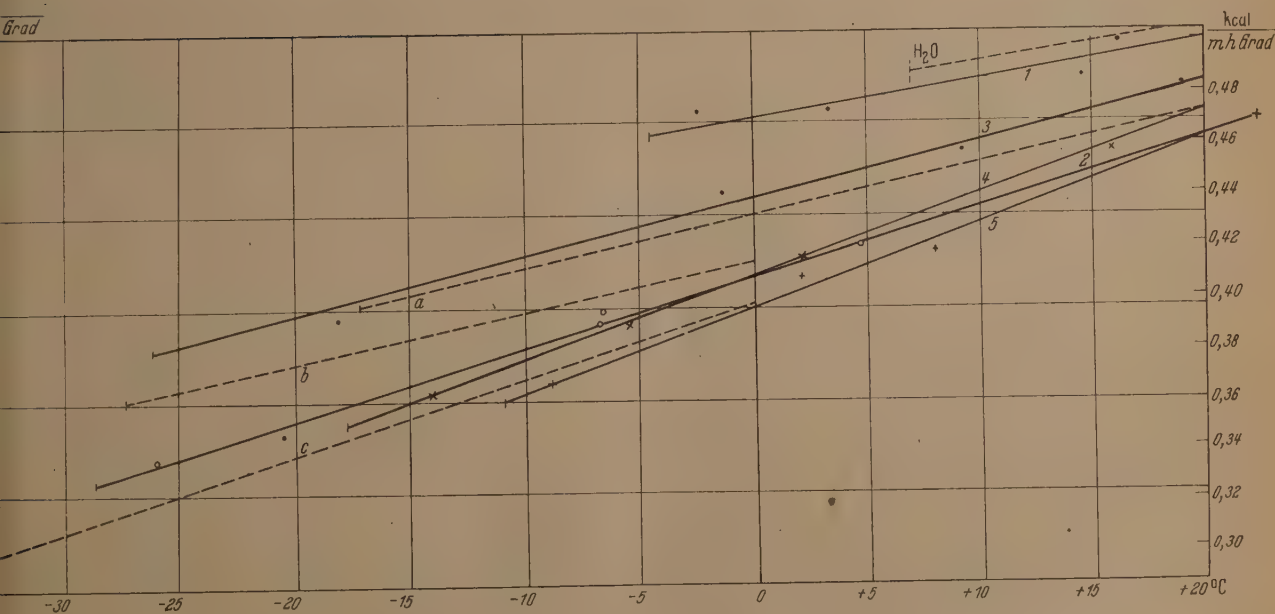
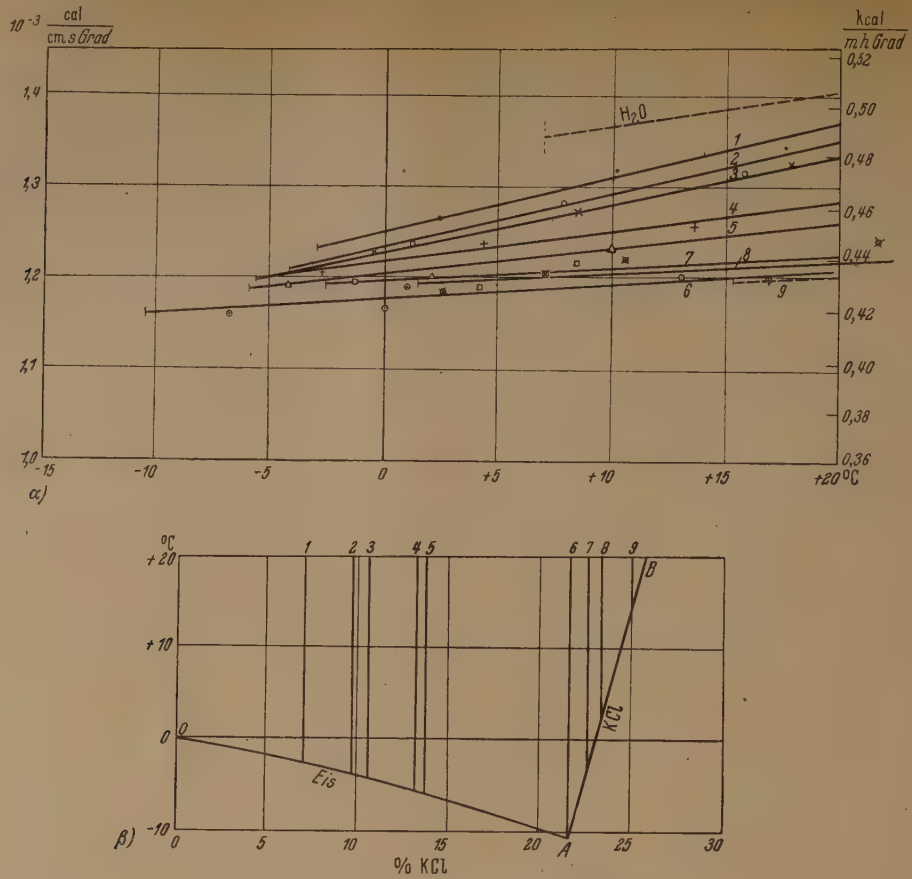
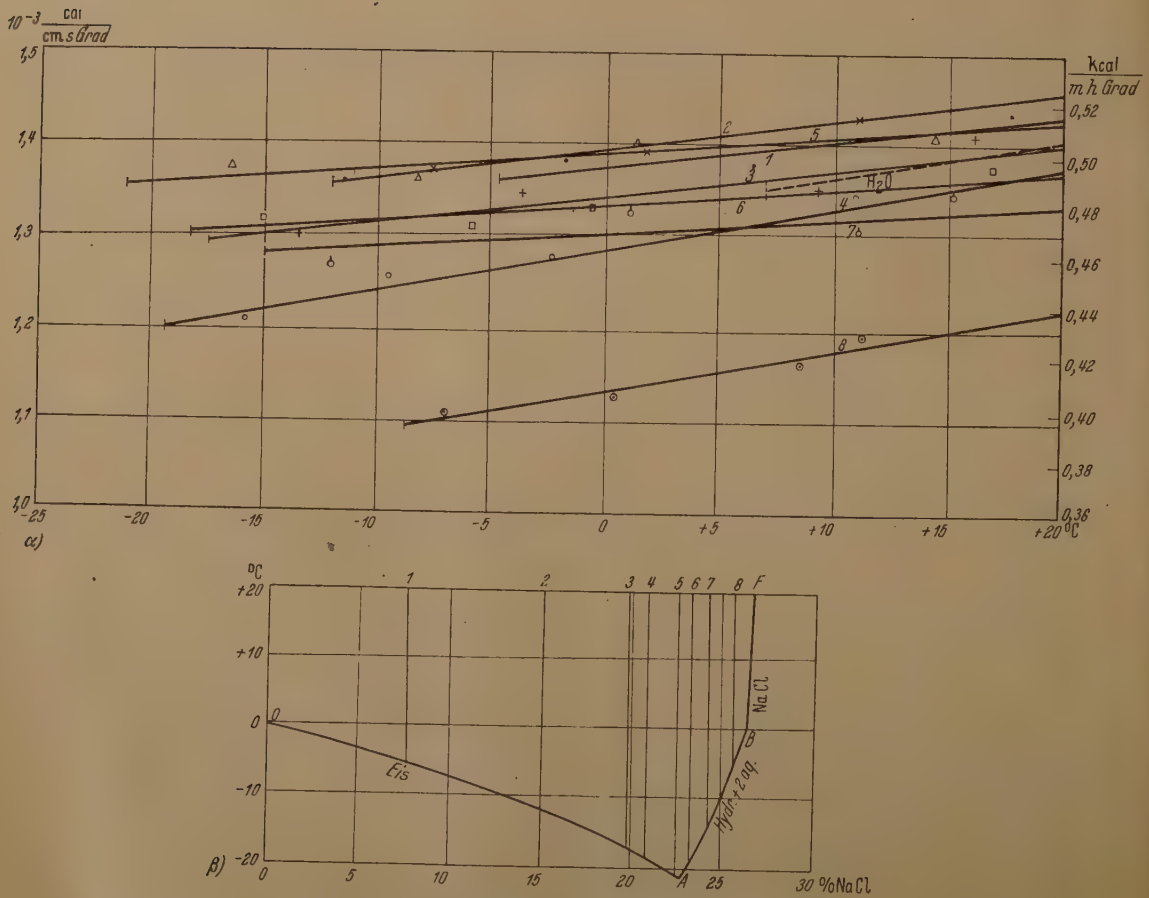


Abb. 3 α u. β. Ergebnisse für MgCl_2 - H_2O -Lösungen.

Abb. 4 α u. β. Ergebnisse für KCl-H₂O-Lösungen.Abb. 5 α u. β. Ergebnisse für NaCl-H₂O-Lösungen.

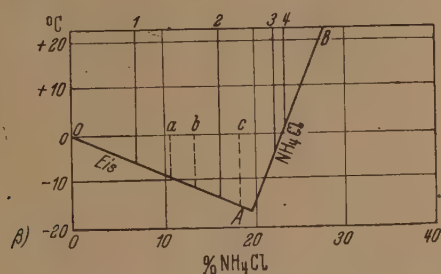
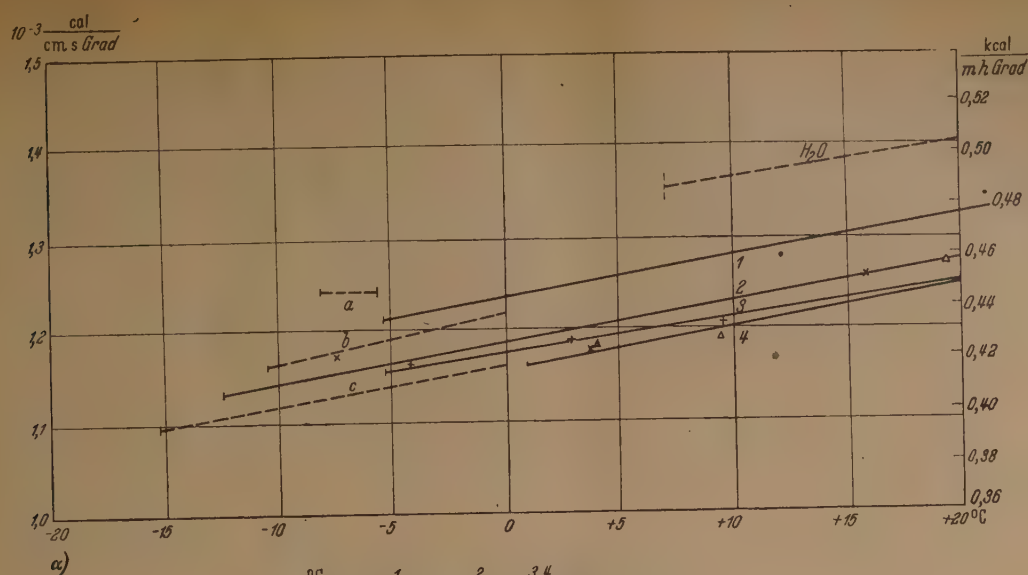


Abb. 6 α u. β. Ergebnisse für $\text{NH}_4\text{Cl}-\text{H}_2\text{O}$ -Lösungen.

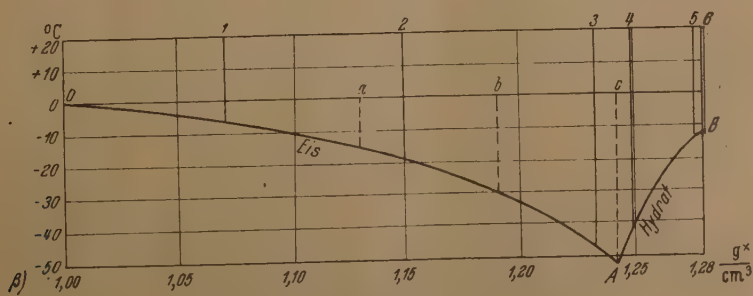
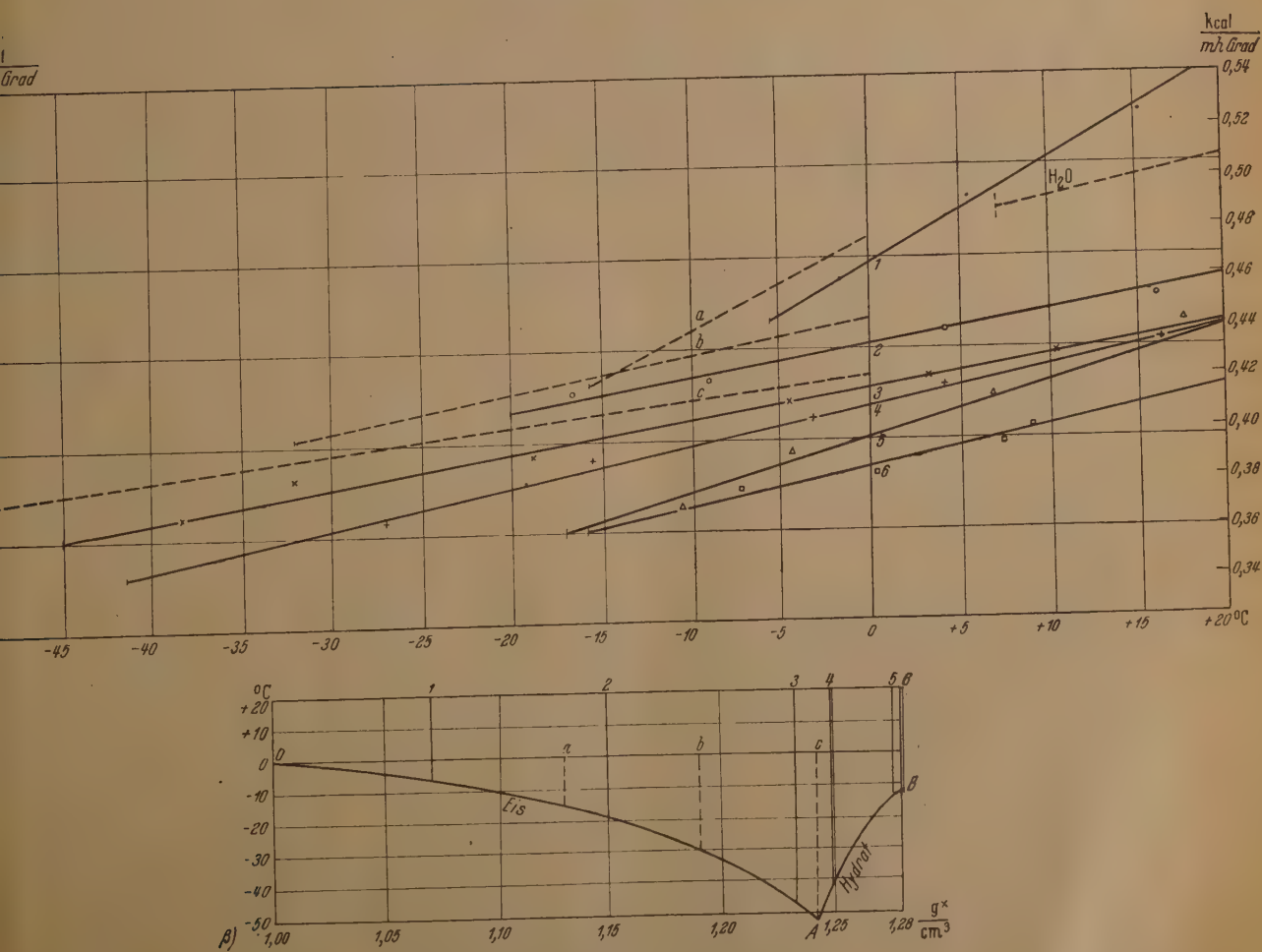
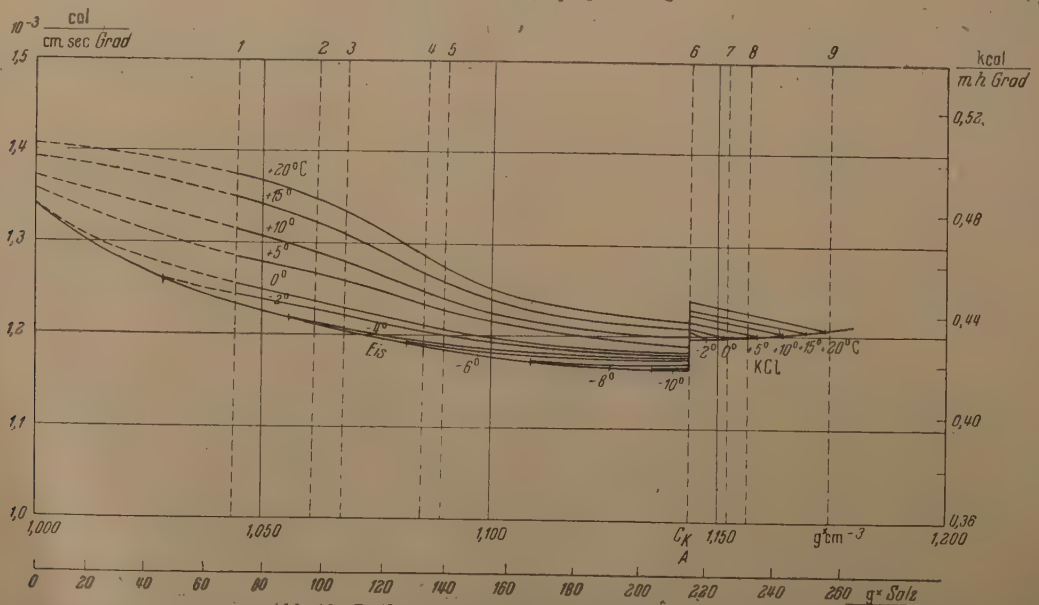
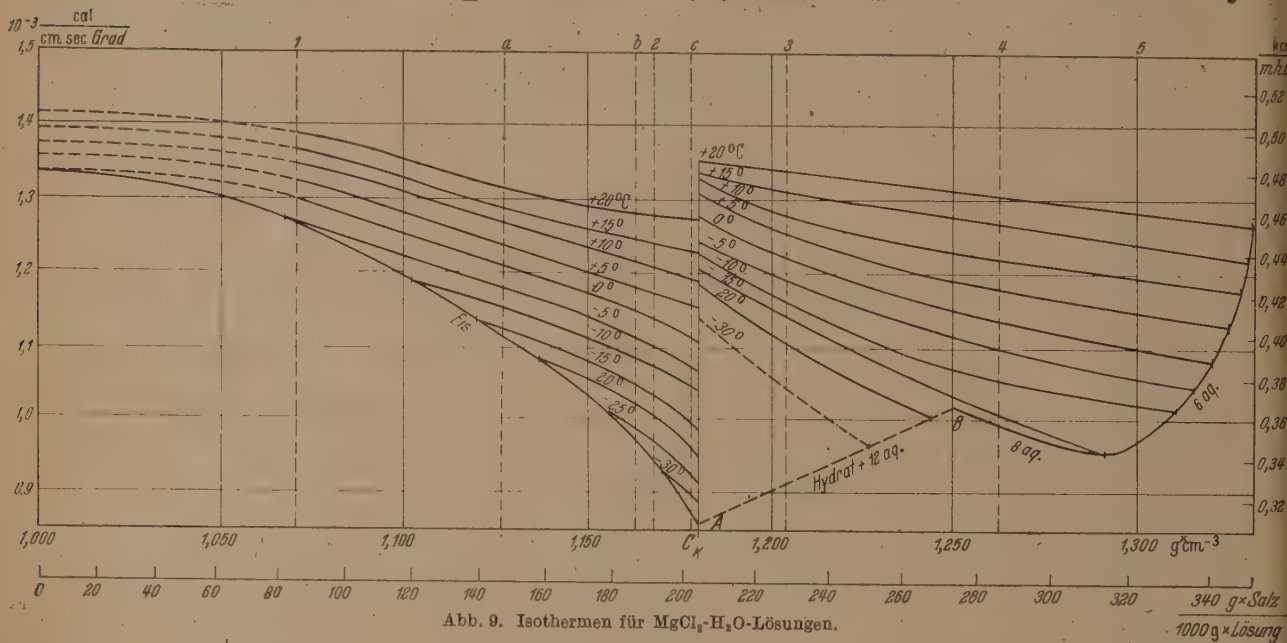
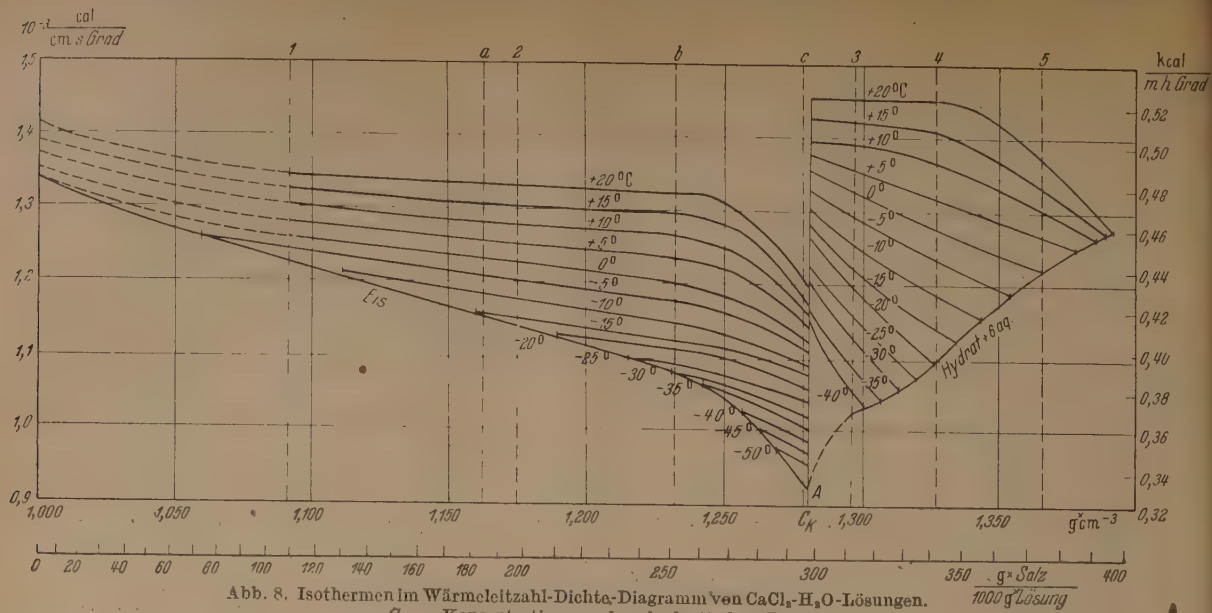


Abb. 7 α u. β. Ergebnisse für Reinhardt- H_2O .



Anmerkung bei der Korrektur: Die Linie 9 ist fälschlicherweise zu weit rechts gezeichnet. Sie muß durch den Punkt 250 der unteren Skala gehen.

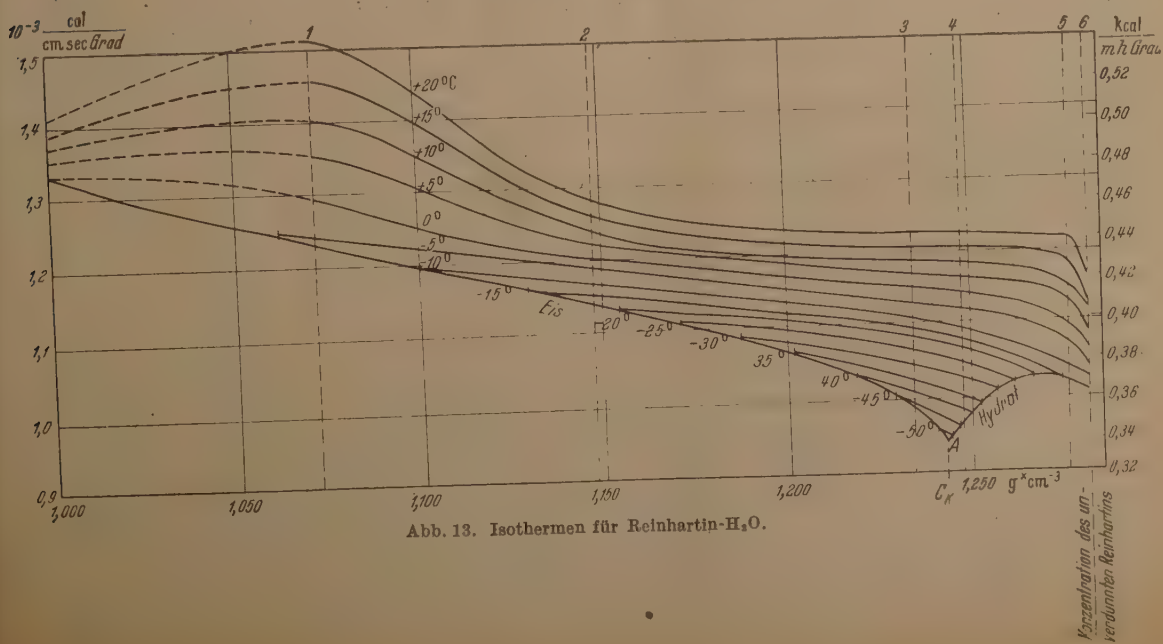
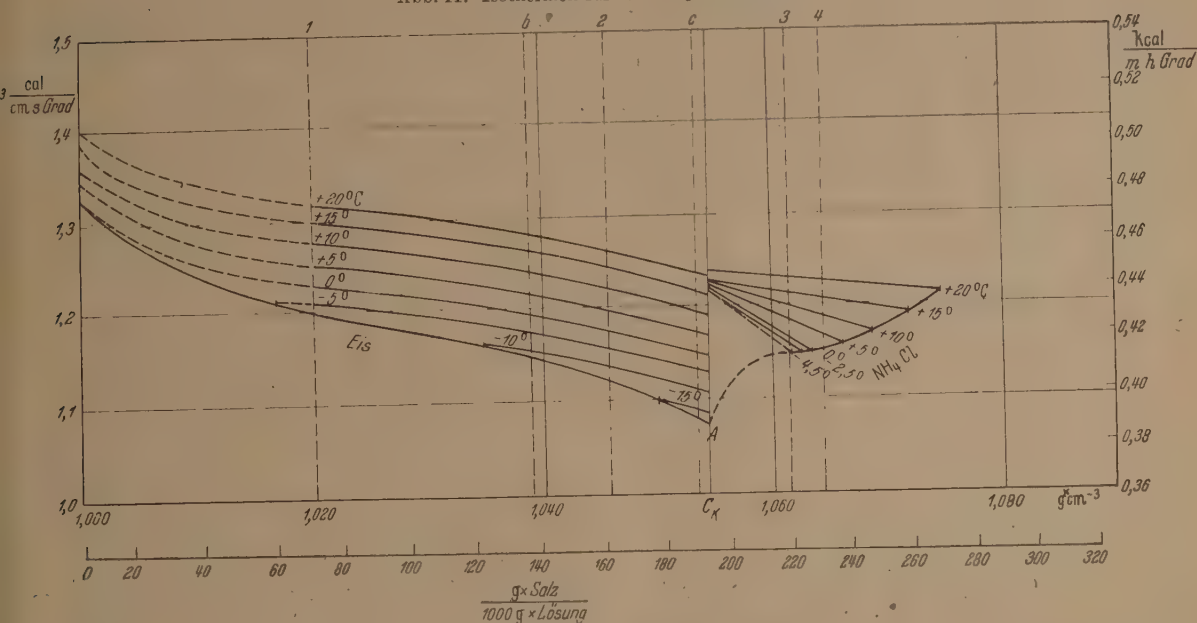
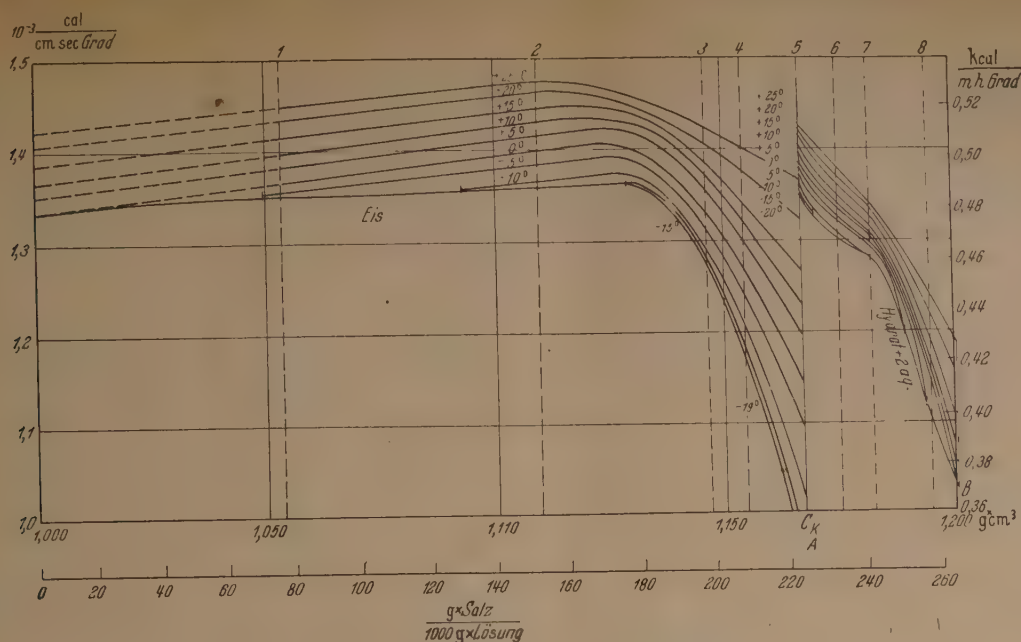


Tabelle 1.

Art der Lösung: $\text{CaCl}_2\text{—H}_2\text{O}$. Kryohydratischer Punkt:
Konzentration $c_k = 29,9\%$, Temperatur $t_k = -55^\circ\text{C}$.

Dichte der Lösung bei 20°C gcm^{-3} bzw. Gew.-% Salz	Temperatur der Lösung $^\circ\text{C}$	Unterste Grenze der Abkühlung $^\circ\text{C}$	λ $10^{-3} \frac{\text{cal}}{\text{cm sec Grad}}$
1,092 = 10,91 %	+ 12,3 + 3,4 — 1,0	— 4,5	1,302 1,262 1,264
1,174 = 19,17 %	+ 12,1 + 7,7 — 5,2 — 12,8	— 20,1	1,285 1,261 1,196 1,160
1,296 = 31,25 %	+ 14,2 + 1,2 — 8,5 — 27,4	— 40,0	1,412 1,324 1,280 1,130
1,326 = 34,00 %	+ 16,8 + 7,5 + 4,5 — 3,0 — 15,0	— 17,0	1,422 1,340 1,299 1,250 1,141
1,365 = 37,36 %	+ 16,4 + 10,9 + 9,6 + 7,25 + 1,0	+ 0,5	1,369 1,311 1,288 1,275 1,246

Messungen anderer Autoren.

E. MEYER.

1,278	— 45,8 — 32,7 — 33,1 — 10,1	— 51,0	0,97 1,02 1,05 1,05
1,232	— 22,4 — 11,1 — 0,5	— 30,4	1,06 1,13 1,20
1,163	— 9,4 — 4,5 + 3,0	— 15,0	1,19 1,24 1,29

G. JÄGER.

15 %	+ 32		1,383
30 %			1,315

Tabelle 2.

Art der Lösung: $\text{MgCl}_2\text{—H}_2\text{O}$. Kryohydratischer Punkt:
Konzentration $c_k = 20,6\%$, Temperatur $t_k = -33,6^\circ\text{C}$.

Dichte der Lösung bei 20°C gcm^{-3} bzw. Gew.-% Salz	Temperatur der Lösung $^\circ\text{C}$	Unterste Grenze der Abkühlung $^\circ\text{C}$	λ $10^{-3} \frac{\text{cal}}{\text{cm sec Grad}}$
1,070 = 8,55 %	+ 16,0 + 14,6 + 3,3 — 2,5	— 4,5	1,385 1,349 1,311 1,308
1,169 = 19,24 %	+ 4,7 — 6,65 — 6,8 — 26,3	— 28,9	1,166 1,098 1,081 0,936
1,204 = 22,89 %	+ 19,2 + 9,2 — 1,3 — 18,2	— 26,4	1,333 1,271 1,222 1,089
1,262 = 28,58 %	+ 15,8 + 2,1 — 5,7 — 14,2	— 17,9	1,266 1,151 1,084 1,009
1,300 = 32,14 %	+ 22,3 + 8,1 + 2,15 — 8,9	— 10,9	1,300 1,162 1,135 1,020

Messungen anderer Autoren.

E. MEYER.

1,180	— 27,5 — 16,9 — 8,5	— 33,5	0,885 0,96 1,05
1,164	— 16,3 — 7,8 — 2,7	— 27,5	1,06 1,11 1,13
1,128	— 8,4 — 0,4 + 14,9	— 17,2	1,15 1,20 1,28

G. JÄGER.

11 %	+ 32		1,376
14,5 %			1,329
22 %			1,290
29 %			1,238

dann mit weiter steigender Konzentration wieder abzufallen. Bei den Reinhartin-Solen weisen die Isothermen am kryohydratischen Punkt keine Unstetigkeit auf. Die Reinhartin-Solen enthalten in der Hauptsache ein Salzgemisch von CaCl_2 und MgCl_2 neben anderen Stoffen. Der für die Lösungen mit nur 2 Komponenten typische sprunghafte Anstieg des Wärmeleitwerts scheint also bei der Anwesenheit von mehr als 2 Lösungskomponenten nicht zur Ausbildung zu gelangen. Dieser überraschende Sprung der Wärmeleitfähigkeit bedarf noch spezieller Untersuchungen zu seiner Klärung.

In den Diagrammen Abb. 8—13 wurden die Isothermen bis zu den Konzentrationswerten verlängert, bei deren Überschreitung eine Ausscheidung einer der beiden Lösungskomponenten in fester Form eintritt. Die so gewonnenen, durch einen senkrechten Strich gekennzeichneten Endpunkte wurden durch einen Kurvenzug verbunden. Für Konzentrationen oberhalb der kryohydratischen Konzentrationen gibt diese Kurve die Wärmeleitfähigkeit der bei den entsprechenden Temperaturen gesättigten Lösungen an. Soweit der Verlauf dieser Grenzkurve nicht sichergestellt ist, wurde sie gestrichelt gezeichnet. Ebenso sind die Isothermen unterhalb der kleinsten gemessenen

Konzentration gestrichelt gezeichnet. Als Ausgangspunkte für die Isothermen wurden die Wärmeleitwerte des reinen Wassers entsprechend den angegebenen Temperaturen gewählt. Als Ausgangspunkt der O-Isotherme wurde der auf 0°C extrapolierte Wert $\lambda_{\text{H}_2\text{O}, 0^\circ\text{C}} = 1,325 \cdot 10^{-3} \frac{\text{cal}}{\text{cm sec Grad}}$ angenommen.

Am kryohydratischen Punkt war in allen untersuchten Fällen die Wärmeleitfähigkeit ein Minimum.

Wie die Abb. 8—13 zeigen, verlaufen die Isothermen bei geringer Lösungsdichte etwa linear mit zunehmender Konzentration. Ein solcher Verlauf wurde auch von anderen Autoren angenommen. So gibt JÄGER [11] für die Leitfähigkeit von CaCl_2 und MgCl_2 bei 32°C an:

$$\lambda_{32^\circ\text{C}} = \lambda_{\text{H}_2\text{O}, 32^\circ\text{C}} (1 - 0,00488 \cdot c) \quad \text{für } \text{CaCl}_2,$$

$$\lambda_{32^\circ\text{C}} = \lambda_{\text{H}_2\text{O}, 32^\circ\text{C}} (1 - 0,00309 \cdot c) \quad \text{für } \text{MgCl}_2;$$

dabei bedeutet c die Konzentration in Prozent. JÄGER benutzte für seine Messungen die Methode von H. F. WEBER [11]. Seine Werte sind relativ zu der Leitfähigkeit von Wasser angegeben.

Weitere in der Literatur auffindbare Wärmeleitwerte wurden zur Vervollständigung in die Tabellen 1—6 mit aufgenommen [11], [12], [13].

Tabelle 3.

Art der Lösung: KCl-H₂O. Kryohydratischer Punkt:
Konzentration $c_k = 24,60\%$, Temperatur $t_k = -10,7^\circ\text{C}$.

Dichte der Lösung bei 20°C ρ_{20} bzw. Gew.-% Salz	Temperatur der Lösung $^\circ\text{C}$	Unterste Grenze der Abkühlung $^\circ\text{C}$	λ $10^{-3} \frac{\text{cal}}{\text{cm sec Grad}}$
1,044	+17,6	- 3,1	1,342
7,12%	+10,1		1,316
	+ 2,3		1,264
1,062	+15,8	- 4,3	1,317
9,73%	+ 7,8		1,283
	+ 1,3		1,235
1,068	+17,8	- 4,7	1,324
10,62%	+ 8,3		1,269
	- 0,4		1,231
1,085	+13,6	- 5,7	1,258
13,17%	+ 4,3		1,235
	- 2,8		1,206
1,089	+10,0	- 6,1	1,230
13,80%	+ 2,0		1,203
	- 4,3		1,196
1,143	+13,0	- 10,6	1,200
21,43%	+ 0,9		1,190
	0,0		1,166
	- 6,8		1,157
1,152	+ 8,4	- 2,7	1,214
22,58%	+ 4,0		1,191
	- 1,3		1,195
1,156	+21,9	+ 1,4	1,241
23,14%	+10,5		1,220
	+ 7,0		1,203
	+ 2,5		1,181
1,174	+17,1	+15,0	1,204
25,0%			

Messungen anderer Autoren.

JÄGER: KCl 20% $\lambda = 1,334 \cdot \frac{10^{-3} \text{ cal}}{\text{cm sec Grad}}$ bei 32°C .

Die Meßergebnisse von MEYER [1] stimmen mit den in dieser Arbeit gefundenen Resultaten für Lösungen von CaCl₂ und MgCl₂ innerhalb der Fehlergrenzen gut überein. Abweichungen bis etwa 5% treten bei Reinhart auf, was vielleicht in einer verschiedenen Zusammensetzung der verwendeten Solen die Ursache hat. Bei NH₄Cl war ein Teil der Meßwerte bei MEYER unsicher und wurde daher durch Nachmessungen ersetzt.

Die in Abb. 2—7 gestrichelt eingezeichneten, mit lateinischen Buchstaben versehenen Geraden sind aus den Meßergebnissen von MEYER gewonnen. In den Fällen der Übereinstimmung wurden die Werte von MEYER bei der Aufstellung der Diagramme Abb. 8—13 mit verwendet.

Bei den Messungen an CaCl₂ wurden in einigen Fällen benachbarte Konzentrationen gewählt, um die Reproduzierbarkeit der Messungen zu überprüfen. Das Ergebnis war positiv. Zur Kontrolle wurden in größeren Zeitabständen Messungen an Wasser durchgeführt. Die Abweichungen von den nach einer Formel von JAKOB [14] errechneten Werten sind $\leq \pm 1,6\%$ und als zufällige Meßfehler zu werten. Schließlich sei noch bemerkt, daß die Anzeigen des Differentialthermoelements und der Thermolemente $ThE 2$, $ThE 3$ und $ThE 4$ übereinstimmend eine lineare Abnahme der Temperatur von der Heizplatte zur Kühlplatte anzeigten, was die Berechtigung der Annahme paralleler ebener Isothermenflächen unterstreicht.

Tabelle 4.

Art der Lösung: NaCl-H₂O. Kryohydratischer Punkt:
Konzentration $c_k = 22,42\%$, Temperatur $t_k = -21,2^\circ\text{C}$.

Dichte der Lösung bei 20°C ρ_{20} bzw. Gew.-% Salz	Temperatur der Lösung $^\circ\text{C}$	Unterste Grenze der Abkühlung $^\circ\text{C}$	λ $10^{-3} \frac{\text{cal}}{\text{cm sec Grad}}$
1,053	+17,7	- 4,8	1,436
= 7,59%	+ 6,2		1,375
	- 2,2		1,383
1,110	+11,0	- 12,0	1,432
= 15,11%	+ 1,75		1,394
	- 7,7		1,376
1,146	+16,0	- 17,5	1,412
= 19,73%	+ 9,1		1,347
	- 3,8		1,348
	- 13,5		1,301
1,154	+10,9	- 19,3	1,337
= 20,77%	- 2,35		1,275
	- 9,5		1,253
	- 15,9		1,211
1,167	+14,3	- 21,3	1,406
= 22,31%	+ 1,2		1,405
	- 8,4		1,360
	- 16,5		1,352
1,175	+16,9	- 18,5	1,370
= 23,28%	- 0,7		1,332
	- 6,2		1,313
	- 15,1		1,316
1,181	+15,2	- 15,0	1,343
= 24,12%	+10,9		1,301
	+ 0,9		1,327
	- 12,2		1,271
1,194	+11,3	- 8,9	1,197
= 25,61%	+ 8,7		1,163
	+ 0,5		1,129
	- 6,9		1,104

Messungen anderer Autoren.

G. JÄGER.

12,5%	+ 32°C	1,403
25%	+ 32°C	1,141

H. F. WEBER.

1,178 gcm ⁻³	+ $26,3^\circ\text{C}$	1,35
	+ $4,4^\circ\text{C}$	1,15

LUNDQUIST.

1,178 gcm ⁻³	+ $43,9^\circ\text{C}$	1,49
-------------------------	------------------------	------

L. GRAETZ.

1,153 gcm ⁻³	+ 13°C	1,12
-------------------------	----------------------	------

Genauigkeit der Messung.

Die Bestimmung der Heizleistung wurde mit mehrfach geeichten Präzisionsinstrumenten ausgeführt, die eine Ablesung auf 10^{-3} gestatteten. Der Abstand der Lötstellen des Differentialthermoelements konnte auf 10^{-3} , die Temperaturdifferenz zwischen ihnen mit Sicherheit auf $1/100^\circ$, d. h. im Mittel $5/100$ genau gemessen werden. Die Querschnittsfläche F des Meßraums war auf $3/100$ bestimmt.

Die in Abb. 2—7 eingezeichneten Meßpunkte weichen von den durchgelegten Geraden, in den meisten Fällen um weniger als $\pm 1,5\%$, in einigen Fällen bis zu $\pm 2\%$ ab. Die Streuungen können nicht als durch die oben angegebenen Meßfehler bedingt angesehen werden. Die Genauigkeit der Werte liegt vermutlich bei etwa $\pm 1\%$.

Zusammenfassung.

Es wurden unter Fortsetzung der Untersuchungen von E. MEYER die Wärmeleitwerte von 6 Kühlsolen

Tabelle 5.

Art der Lösung: $\text{NH}_4\text{Cl}-\text{H}_2\text{O}$. Kryohydratischer Punkt:
Konzentration $c_k = 19,5\%$, Temperatur $t_k = -16,0^\circ\text{C}$.

Dichte der Lösung bei 20°C gcm^{-3} bzw. Gew.-% Salz	Temperatur der Lösung $^\circ\text{C}$	Unterste Grenze der Abkühlung $^\circ\text{C}$	λ 10^{-8} cal cm sec Grad
1,020	+21,0	— 5,5	1,342
= 6,98 %	+12,2 0		1,275 1,244
1,046	+16,0	— 12,5	1,257
= 16,22 %	+ 3,7 — 7,6		1,172 1,174
1,062	+ 9,5	— 5,2	1,208
= 21,23 %	+ 2,7 — 4,3		1,184 1,162
1,065	+19,3	+ 0,8	1,270
= 22,95 %	+ 9,5 + 3,9		1,189 1,182

Messungen anderer Autoren.

E. MEYER.

1,053	— 14,3 — 9,3 — 3,5	— 15,3	1,11 1,12 1,14
1,039	— 10,0 — 6,1 — 2,4	— 10,4	1,17 1,18 1,25
1,032	— 8,0 — 5,5	— 8,5	1,24 1,24

nach einem Verfahren gemessen, das darin besteht, daß durch eine waagrecht liegende Flüssigkeitsschicht von oben ein konstant gehaltener Wärmestrom geschickt, und der Temperaturabfall innerhalb der Flüssigkeit mit Hilfe eines Differentialthermoelements bestimmt wird. Die Wärmeleitfähigkeit der Lösungen zeigte bei konstanter Konzentration einen mit der Temperatur linear abfallenden Verlauf. Bei konstant gehaltener Temperatur zeigten die Salzlösungen mit 2 Lösungskomponenten bei Überschreiten der Konzentration des kryohydratischen Punktes einen Sprung der Wärmeleitfähigkeit, während dieser an der aus mehreren Komponenten zusammengesetzten Reinhartinsole nicht auftrat.

Es ist dem Verfasser eine angenehme Pflicht, an dieser Stelle Herrn Prof. W. MEISSNER für das rege Interesse und die wertvollen Hinweise bei der Durchführung der Arbeit den herzlichsten Dank auszusprechen.

Literatur. [1] MEYER, E.: Z. ges. Kälteind. 47, 129 (1940). — [2] HAMMANN, G.: Ann. Phys., Lpz., V. F., 32, 7 (1938). — [3] MEISSNER, W.: Ann. Phys., Lpz. 47, 1010 (1915). — Handbuch der Exper. Physik, Bd. XI, Teil 2, S. 184. — [4] HENNING, F.: Z. Instrumentenkde. 33, 33 (1903). — [5] MEISSNER, W.: Handbuch der Physik, Bd. XI,

Tabelle 6.

Art der Lösung: Reinhartinsole. Kryohydratischer Punkt: Dichte (bezogen auf $+15^\circ\text{C}$) 1,2429 gcm^{-3} .
Temperatur $-51,4^\circ\text{C}$.

Dichte der Lösung bei 20°C gcm^{-3}	Temperatur der Lösung $^\circ\text{C}$	Unterste Grenze der Abkühlung $^\circ\text{C}$	λ 10^{-8} cal cm sec Grad
1,0717	+15,2 + 5,7 — 1,6	— 5,6	1,459 1,363 1,273
1,1473	+16,0 + 4,3 — 8,8 — 16,8	— 20,0	1,259 1,222 1,166 1,154
1,2340	+10,4 + 3,8 — 4,6 — 18,7 — 32,0 — 38,1	— 46,0	1,196 1,171 1,142 1,086 1,065 1,024
1,2479	+16,2 + 4,4 — 3,1 — 15,4 — 26,9	— 42,8	1,206 1,157 1,124 1,086 1,018
1,2776	+17,3 + 6,8 — 4,6 — 10,5	— 17,2	1,228 1,145 1,085 1,025
1,2813 ¹	+ 8,9 + 7,4 + 0,4 — 7,3	— 16,0	1,115 1,098 1,060 1,044

Messungen anderer Autoren.

E. MEYER.

1,243	— 30,0 — 48,0 — 1,5	— 51,4	1,10 1,04 1,116
1,193	— 5,3 — 17,5 — 28,9	— 32,0	1,215 1,155 1,13
1,131	— 4,3 — 8,7 — 13,4	— 15,7	1,265 1,245 1,195

¹ Unverdünnte Reinhartinsole.

S. 332. — [6] MEISSNER, W.: Handbuch der Exper. Phys. Bd. XI, Teil 2, S. 418. — [7] Vgl. HENNING, F.: Temperaturmessung, S. 90. Braunschweig 1915. — [8] HENNING, F. u. W. HEUSE: Z. Phys. 23, 95 (1924). — [9] Wärmetechnische Richtwerte, S. 12. Im Auftrag der Physikalisch-Technischen Reichsanstalt, herausgeg. von F. HENNING-Mitarbeitern. Berlin 1938. — [10] JÄGER, G.: Wien. Ber. 245 (1891). — [11] WEBER, H. F.: Wied. Ann. 10, 103, 3472 (1880). — [12] LUNDQUIST: Undersökning etc. Ups. Univ. arsskrift 1869, 1. — [13] GRAETZ, L.: Wied. An. N. F. 18, 79 (1883); 25, 337 (1885). — [14] JAKOB, M.: Ann. Phys., Lpz., IV. F. 63, 537 (1920).

Schall- und Ultraschallerzeugung in Flüssigkeiten für industrielle Zwecke.

Von W. JANOVSKY, Wiesbaden und R. POHLMAN, Erlangen*.

Mit 7 Textabbildungen.

(Eingegangen am 7. Juni 1943.)

In der Entwicklung der Ultraschalltechnik lassen sich deutlich 3 Stufen unterscheiden. Der Beginn der eigentlichen Ultraschallforschung wäre etwa auf das Jahr 1918 zu verlegen, wo es LANGEVIN gelang, (franz. Patent 505703), einen brauchbaren Weg der

* Die Arbeit wurde bereits 1944 im Zentrallaboratorium der Siemens & Halske A.G. in Berlin abgeschlossen.

Ultraschallerzeugung zu finden. Er nutzte den piezoelektrischen Effekt aus, indem er Quarzkristalle einem Hochfrequenzfeld zu Resonanzschwingung erregte. Eine 2. Methode der Ultraschallerzeugung geht auf PIERCE zurück, der den magnetostriktiven Effekt ferromagnetischer Materialien zur Ultraschallerzeugung heranzog. Er setzte transformatorähnliche

winger aus Nickelblechen zusammen, die mit Hochfrequenz erregt, einen Ultraschallerzeuger guten Leistungsgrades abgaben.

Die 2. Entwicklungsstufe wird durch die grundlegenden Arbeiten von WOOD und LOOMIS im Jahre 1947 eingeleitet. Sie zeigten, daß mittels intensiven Ultraschalls neuartige physikalische und biologische Effekte erzielt werden können. Durch diese Arbeiten angeregt wurde dann von den verschiedensten Stellen versucht, den Ultraschall für zahlreiche Zwecke nutzbringend anzuwenden. Diese Eigenschaften des Ultraschalls sind teils wissenschaftlich von großem Interesse, teils könnten sie meßtechnisch weitgehend ausgenutzt werden; auch war ein vielversprechender Einsatz des Ultraschalls für industrielle Zwecke zu erwarten. Diese Hoffnungen haben sich bisher, wenn es sich um die Beschallung großindustrieller Volumina handelte, stets nicht trügerisch erwiesen. Die Ursache hiervon war nicht etwa die Tatsache, daß die betreffenden Effekte experimentell nicht genügend sichergestellt gewesen und im Großversuch ausgeblieben wären, sondern, daß ein Großversuch gar nicht unternommen werden konnte, da hierfür erforderliche Ultraschallerzeuger fehlten. Es mutet in diesem Zusammenhang merkwürdig an, daß das Ultraschallgebiet selber außerordentlich in die Breite gewachsen ist, die Methoden der Ultraschallerzeugung jedoch, auf geringfügige Verbesserungen der piezoelektrischen und magnetostriktiven Schwinger, praktisch ungeändert geblieben sind wie vor etwa 20 Jahren. Wir stehen daher jetzt in der 3. Entwicklungsstufe, deren Aufgabe es ist, die in Prinzipversuchen nachgewiesenen Effekte in die industrielle Verwertung zu überführen. Voraussetzung hierfür ist, daß auf wirtschaftliche Weise und auch in großen Flüssigkeitsmengen genügend Ultraschallenergie erzeugt werden kann.

Beim piezoelektrischen Schwinger wird ein Quarzkristall, dessen strahlende Fläche senkrecht zur elektrischen Achse geschnitten ist, durch ein angelegtes Hochfrequenzfeld zu Resonanzschwingungen erregt. Beim magnetostriktiven Schwinger wird ein aus ferromagnetischem Material bestehendes, zu Längsschwingungen fähiges System, durch ein hochfrequentes Magnetfeld zu Resonanzschwingungen erregt. In beiden Fällen sind die abstrahlenden Flächen etwa von der Größenordnung 30 bis 100 cm². Außerdem in beiden Prinzipien gemeinsam, daß zum Betrieb der Ultraschallerzeuger ein elektrischer Hochfrequenzgenerator entsprechender Leistung erforderlich ist. Beim piezoelektrischen Prinzip erkennt man leicht, daß eine wesentliche Vergrößerung des Schwingers nicht ohne weiteres möglich ist, da die in der Natur vorkommenden Quarzkristalle einen Durchmesser von 100 bis 150 mm nur selten überschreiten. Man kann hier eine Vergrößerung der abstrahlenden Fläche nur durch Anwendung mehrerer Einzelkristalle erreichen. Ob diese mosaikartig zu einer zusammenhängenden Fläche angeordnet sind oder durch Parallelschaltung zahlreicher Einzelstrahler, ist für die Beschallung großer Mengen zunächst ohne Bedeutung. Jedoch ergibt schon hier eine oberflächliche Rentabilitätsbetrachtung, daß ein derartiges Vorgehen völlig unwirtschaftlich ist infolge des hohen Preises der geschliffenen Quarzkristallplatten, abgesehen von

allen übrigen Faktoren (s. unten). Magnetostriktive Schwinger lassen sich zwar wesentlich wirtschaftlicher herstellen, jedoch bereitet die Erregung zahlreicher parallelgeschalteter Schwinger, etwa mit einer Hochfrequenzmaschine, infolge des Phasenschlupfes ganz erhebliche Schwierigkeiten. Auch ist die Dämpfung magnetostriktiver Schwinger meist wesentlich größer als diejenige der piezoelektrischen. Stellt man auch hier eine ganz rohe Rentabilitätsrechnung an, so ergibt sich sofort, daß auch beim magnetostriktiven Prinzip die Rentabilität in keiner Weise gewährleistet ist, es sei denn, daß es sich um die Beschallung ganz besonders hochwertiger Güter handelt. So kommt es, daß der Ultraschall in der Industrie auf Anwendungsgebieten, die im Laboratorium bereits seit langem bekannt sind und die sich in Volumina von 1 bis 2 l mühelos realisieren lassen, bisher keinen Eingang gefunden hat. Um diesem Übelstand abzuweichen, kommt es also darauf an, einen Ultraschallerzeuger zu besitzen, der in wesentlich einfacherer und rentablerer Weise in einer Flüssigkeit die hineingesteckte Energie in akustische Schwingungen umsetzt. Es liegt auf der Hand, daß die oben genannten Ultraschallerzeuger nicht nur durch ihre verhältnismäßig hohen Eigenkosten (Quarz), sondern auch durch die zugehörigen, kostspieligen Hochfrequenzgeneratoren belastet sind, abgesehen von der verhältnismäßig unrentablen Energieumsetzung infolge des elektroakustischen Umweges.

Unser Bestreben war es demnach, alle diese schädlichen Faktoren auszuschalten und auf möglichst direktem Wege aus mechanischer Strömungsenergie Schwingungsenergie in einer Flüssigkeit zu erzeugen. Es ist bekannt, daß in Luft mit Hilfe von Pfeifen auf einfache Weise und in direktem Wege Schall erzeugt werden kann. Dabei sind für die Erzeugung hoher Frequenzen 2 Verfahren zu unterscheiden. Einmal die normale Lippenpfeife und zweitens der HARTMANN-Generator [1]. Bei der ersteren strömt die Luft aus einer dünnen Düse gegen eine Schneide, wobei sich links und rechts dieser Schneide Wirbel ablösen und zu einer Schallerzeugung führen. Die Frequenz der Schneidentöne hängt im wesentlichen von der Entfernung Schneide — Düse und der Anblasgeschwindigkeit ab. Die Schallerzeugung wird besonders stabil und erreicht entsprechend hohe Intensitäten, wenn mit der Schneide ein geeignet abgestimmter Resonator gekoppelt wird. Bei dem HARTMANN-Generator prallt ein mit Überschallgeschwindigkeit ausströmender Luftstrom gegen eine Platte. Zwischen der Platte und der Düse bilden sich dann äußerst intensive Schallwellen aus, die ebenfalls durch einen Resonator stabilisiert werden können. Abgesehen von Zungenpfeifen, die jedoch nur bei tiefen Frequenzen arbeiten, kommen für die Schall- und Ultraschallerzeugung in Luft auch Sirenen in Frage.

Es war nun die Aufgabe, zu prüfen, wieweit die erstgenannten Generatoren auch in Flüssigkeiten brauchbar sind. Das Verfahren von HARTMANN, das in Luft zu so überraschend guten Erfolgen geführt hat, ist leider für Flüssigkeiten nicht anwendbar, da es nicht möglich ist, eine Flüssigkeit aus einer Düse mit Überschallgeschwindigkeit, also mit mehr als etwa 1500 m/sec, ausströmen zu lassen. Wohl kann man die von einem HARTMANN-Generator erzeugte

Energie in geeigneter Weise in eine Flüssigkeit überleiten, wie es EHRET und HAHNEMANN [2] getan haben, indem sie den Generator selbst zwar in Luft schwingen lassen, jedoch den Boden des Resonators mit der zu beschallenden Flüssigkeit koppeln und auf diese Weise jedenfalls einen Teil der erzeugten Energie in die Flüssigkeit übertragen. Wir haben

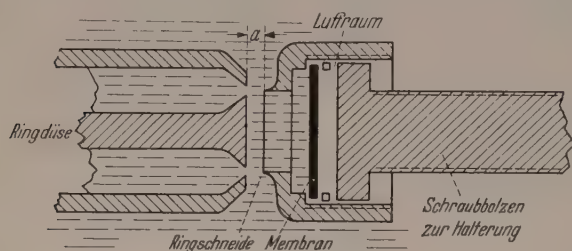


Abb. 1. Membranpfeife.

versucht, die Schallenergie in der Flüssigkeit selber zu erzeugen und das Verfahren der normalen GALTON-Pfeife in Flüssigkeiten anzuwenden. Es ist zwar bekannt, daß Lippenpfeifen auch in Flüssigkeiten funktionieren, bei diesen Versuchen handelte es sich aber immer nur um Demonstrationszwecke, die im



Abb. 2. Schneidenpfeife.

allgemeinen bei sehr tiefen Frequenzen vorgenommen wurden und die Aufgabe hatten, die Entstehung und Ablösung der Wirbel zu zeigen. Brauchbare Schallintensitäten wurden hierbei jedoch nicht erreicht, da es auch gar nicht auf sie ankam. Eine für technische Zwecke verwendbare Pfeife dagegen ist noch



Abb. 3. Technische Ausführung der Schneidenpfeife. (Werkphoto der Siemens-Schuckertwerke A.G.)

nicht gebaut worden. Dies dürfte daran liegen, daß das in Luft gut arbeitende Prinzip des Hohlraumresonators, das erst hohe Intensitäten möglich macht, nicht einfach auf eine Flüssigkeit übertragen werden kann, und zwar deshalb nicht, weil der Wellenwiderstand einer Flüssigkeit etwa 4000mal so groß ist wie der von Luft.

Um dieser Schwierigkeit zu begegnen, schlugen wir verschiedene Wege ein. Der Grundgedanke besteht darin, daß es in einer Flüssigkeit im Gegensatz zu einem Gase besonders gut möglich sein müsse, auf Grund des verhältnismäßig ähnlichen Schallwellenwiderstandes von Flüssigkeit und festem Körper durch die austretende Flüssigkeitslamelle einen festen Körper in seinen Eigenschwingungen zu erregen. Die Flüssigkeit erregt also nicht ein abgegrenztes Flüssigkeitsvolumen in seiner Eigenfrequenz, wie es die Analogie zur Luftpfeife erfordern

würde, sondern einen festen Körper. Abb. 1 zeigt ein Beispiel. Eine Ringdüse und eine ringförmige Schneide befinden sich vor einer Kammer, die mit Luft gefüllt und vorn durch eine Membrane abgeschlossen ist. Das ganze System ist an einem Schraubbolzen gehalten und kann gegen die Düse verstellt werden. Ergibt der Abstand a zwischen Düse und Schneide gerade die Frequenz $\nu = \frac{u}{a}$ (u = Strömungsgeschwindigkeit), die mit der Eigenfrequenz des Systems übereinstimmt, so gerät die Pfeife in Resonanz und erzielt die höchste Leistung. Die gewünschte Frequenz kann also leicht durch entsprechende Wahl der Membrane und Abstimmung der Entfernung a erzielt werden. Eine gewisse Schwierigkeit liegt darin, daß die meisten Flüssigkeiten, insbesondere Wasser, bei Beschallung entgasen. Das freiwerdende Gas, im allgemeinen Luft, wird in den Pfeifenkörper hineingeblasen, sammelt sich dort und macht bei weiterem Betrieb die Schwingungsverhältnisse sehr labil. Deshalb wurde noch ein anderer Weg beschritten, der jegliche Hohlräume, in denen sich Gasblasen sammeln könnten, vermeidet. Abb. 2 stellt diese Lösung dar. Hier wird eine Schneide, die flach ausgebildet und in ihren Knotenpunkten gehalten ist, durch den aus der Spaltdüse austretenden Flüssigkeitsstrahl zu Biegeschwingungen erregt. Das Oszillogramm zeigt eine sehr saubere und bei Resonanzeinstellung der Entfernung a zwischen Schneide und Düse, gut resonanzüberhöhte Sinusschwingung¹.

Abb. 3 zeigt eine technische Ausführung der Pfeife. Sie kann in das Gefäß mit der zu beschallenden Flüssigkeit, selbst durch verhältnismäßig enge Öffnungen, eingetaucht werden. Man erkennt rechts im Bild den Anschlußstutzen für die Anblasflüssigkeit sowie den Abstimmknopf, links Düse und Schneide, deren Abstand durch den Abstimmknopf verändert werden kann.

Bläst man die Pfeife mit Wasser, z. B. aus der Wasserleitung an, so zeigt sich zwischen Schneide und Düse in Unterwasserdunkelfeldbeleuchtung, bei der also nur das gestreute Licht benutzt wird, bei Resonanzabstimmung eine weißliche Nebelzone. Verhindert man die Entstehung des intensiven Tones, indem man z. B. die Schneide hinten stark dämpft, so verschwindet gleichzeitig die Nebelzone. Sie entsteht immer nur bei maximaler Tonbildung. Hieraus läßt sich schließen, daß die Schallintensität zwischen Schneide und Düse derartige Werte besitzen muß, daß die Kavitationsgrenze überschritten ist. Für uns genügt bereits die geschilderte Tatsache, daß sich aus ihr mit Sicherheit entnehmen läßt, daß wir in der Flüssigkeitspfeife einen Schall- bzw. Ultraschall-erzeuger besitzen, der Intensitäten zu liefern gestattet, die die Kavitationsgrenze überschreiten. Dieser Umstand ist von ausschlaggebender Bedeutung, da es bekannt ist, daß die Bildung von Emulsionen, die Entkeimung von Flüssigkeiten und anderes mehr, auf der intensiven Kavitation im Schallfeld beruhen. Es ergibt sich somit durch die Flüssigkeitspfeife die Möglichkeit, alle auf der intensiven Kavitationswirkung des Ultraschallfeldes beruhenden Effekte im großen Maßstab zu realisieren. Die Herstellung z. B. einer Öl-Wasser-Emulsion vollzieht sich also in der Weise, daß die Pfeife in Wasser

¹ Es wurden Frequenzen von 4 bis 32 kHz erzeugt.

etaucht und mit Öl angeblasen wird oder um-
hrt. Hierbei muß jedes Öltröpfchen die Zone
ker Kavitation zwischen Düse und Schneide
ieren, wo es aufs gründlichste emulgiert wird.
es Verfahren läßt sich natürlich auch im Umlauf
enden, indem die erhaltene Emulsion nochmals
Pfeife durchläuft. Allerdings besteht bei einem

fotografische Beobachtungen möglichst allseitig offen
konstruiert war. Abb. 4b zeigt das erste Ausströmen
der gebildeten Emulsion nach $\frac{1}{16}$ sec. Abb. 4c, d,
e und f nach $\frac{1}{4}$, $\frac{1}{2}$, 1 und 2 sec. Diese Zahlen und
Bilder gestatten schon auf den ersten Blick, die außer-
ordentliche Überlegenheit der Ultraschallpfeife, z. B.
für Emulsionserzeugung, gegenüber einem normalen

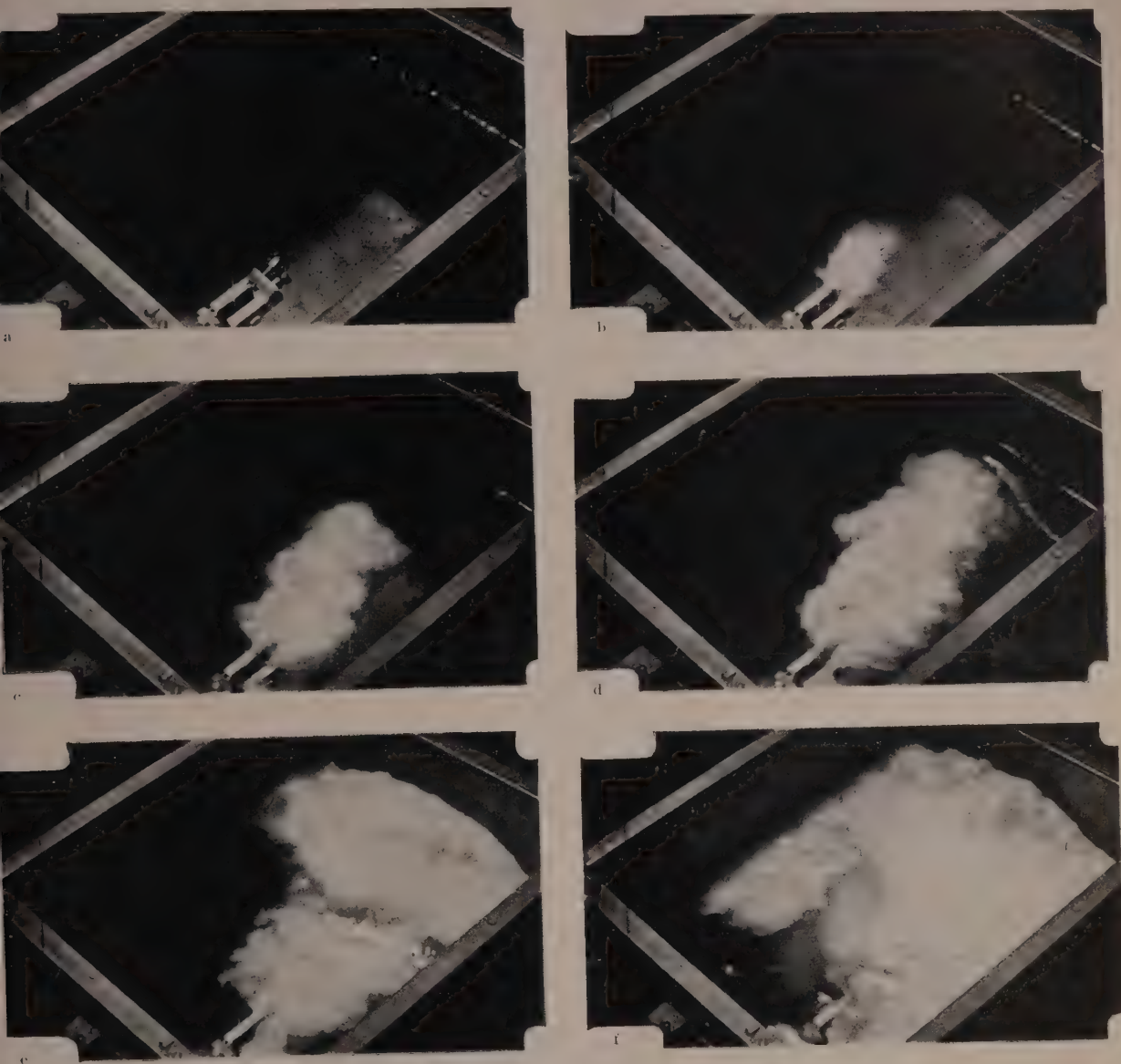


Abb. 4a—f. a Emulsionsbildung in einem Tank von 50 l Inhalt; b nach $\frac{1}{16}$ sec; c nach $\frac{1}{4}$ sec; d nach $\frac{1}{2}$ sec; e nach 1 sec; f nach 2 sec.

erartigen Vorgehen ein Wirkungsmaximum (2 bis
maliges Durchblasen). Bei zu oftmaligem Durch-
blasen koaguliert die Emulsion wieder und ver-
röbert sich. Die Pfeife hat überdies den gebräuch-
lichen Ultraschallgeneratoren gegenüber den Vorteil,
daß sie infolge der starken Flüssigkeitsströmung
selbsttätig für eine intensive Durchmischung der be-
handelten Flüssigkeiten sorgt.

Um eine Anschauung von der Wirkungsweise und
Schnelligkeit der Emulgierung zu vermitteln, sind
in Abb. 4 Bilder aus einem Filmstreifen heraus-
geschnitten. Abb. 4a zeigt den mit Wasser gefüllten
Emulsionstank von den Ausmaßen $35 \times 38 \times 40$ cm
und einem Fassungsvermögen von etwa 50 l. Innen
erkennt man die kleine Pfeife, die für optische und

Magnetostriktionsschwinger abzuschätzen, wenn man
bedenkt, daß der Emulgierungszustand des letzten
Reihenbildes bereits nach 2 sec erreicht ist, während
die Emulgierung mittels eines Magnetostriktions-
senders ein sehr langsam verlaufender Vorgang mit
einer Erzeugung von nur etwa 5 l/Std. ist.

Hier könnte eingewandt werden, daß es auch
möglich ist, ohne Zuhilfenahme des Schalls, ledig-
lich durch das Ausströmen aus einer Düse, Emul-
sionen zu erzeugen. Das ist richtig. Es gibt ja
außerdem noch manigfache Arten, Emulsionen her-
zustellen. Die Verwendung von Ultraschall bietet
jedoch trotzdem einen Fortschritt, weil es mit
ihm gelingt, besonders hochwertige, hochprozentige
und haltbare Emulsionen darzustellen. Es mußte

demnach geprüft werden, wie weit der Schall wirklich an der Emulsionsbildung beteiligt ist. Zu diesem Zwecke wurde unter genau gleichen Bedingungen einmal eine Emulsion ohne Schallerreger (Schneide) nur aus der Düse allein geblasen, das andere Mal mit Schallerreger wie in Abb. 4. Abb. 5 zeigt beide Emulsionen nach viertägiger Standdauer, also nach dem Zerfall, links die mit der Pfeife geblasene, rechts die



Abb. 5. Vergleich von Pfeifen- und Düsenemulsion nach dem Zerfall. Auf dem nur noch getrübbten Wasser schwimmt die ursprünglich in der Emulsion enthaltene Ölmenge. Mit der Pfeife (links) wurde demnach eine 20%ige, mit der Düse (rechts) nur eine 5%ige Emulsion gewonnen.

mit der Düse erzeugte. Man erkennt, daß unter gleichen Bedingungen durch Einwirkung des Schalles eine 20%ige, ohne Schall nur eine 5%ige Emulsion erzeugt wurde. Außerdem ist bei der Pfeifenemulsion auch die umgekehrte Phase (Wasser in Öl) an der Grenzschicht beider Komponenten in merklicher Schicht vertreten, während sich bei der Düsenemulsion nur ganz geringe Spuren hiervon finden. Endlich ist die Düsenemulsion nach 4 Tagen wesentlich mehr zerfallen als die Pfeifenemulsion. Während sich links die Abscheidungsgrenze zwischen getrübbtem Wasser und fein disperser Emulsion noch etwa in der Mitte des Standzylinders befindet, ist sie rechts seit langem (etwa 2 Tagen) bereits oben abgekommen, und es ist nur noch getrübbtes Wasser im Zylinder.

Will man eine möglichst gute Emulsion herstellen und zu einem kontinuierlich arbeitenden Vorgang kommen, so ist es natürlich nicht zweckmäßig, in der in Abb. 4 gezeigten Anordnung, d. h. in einem

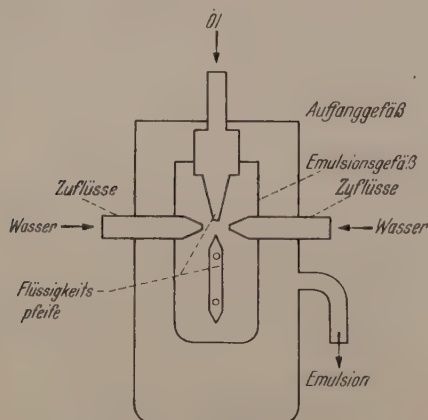


Abb. 6. Emulgierungsgefäß.

verhältnismäßig großen Tank mit einem starken Überschuß der einen Komponente zu arbeiten, da die entfernt liegenden Wassermengen an dem Emulsionsvorgang praktisch nicht teilnehmen, sondern im Endergebnis nur dazu führen, die von der Pfeife erzeugte gute Emulsion zu „verwässern“. Andererseits muß jedoch dafür gesorgt werden, daß beim Arbeiten im entsprechend kleinen Tank eine zu starke Anreicherung der eingeblasenen Komponente in der Nähe der Schneide vermieden wird, da durch die entsprechende Verarmung der anderen Komponente dann wiederum eine Emulgierung sehr erschwert werden würde. Abb. 6 zeigt eine brauch-

bare Anordnung schematisch. Durch die Pfeife, die sich in einem möglichst kleinen z. B. mit Wasser gefüllten Behälter befindet, wird das Öl eingeblasen. Im gewünschten Verhältnis wird gleichzeitig durch die Zuflußrohre Wasser gegeben. Die sich fortlaufend bildende Emulsion läuft aus dem Emulsionsgefäß über in das Auffanggefäß, dem etwa in halber Höhe die fertige Emulsion entnommen wird, um die eventuell im Überschuß vorhandenen und nicht restlos emulgierten Komponenten ein Absetzen zu ermöglichen und sie nicht mit zu erfassen. Die abgesetzten Komponenten können natürlich ohne weiteres wieder den Ausgangsflüssigkeiten zugeleitet und mit ihnen erneut durch die Pfeife gegeben werden.

Um zu einem zahlenmäßigen Leistungsvergleich zu gelangen, der wirklich für eine industrielle Anwendung maßgeblich ist, wurden Leistungsmessungen an einer magnetostriktiven Emulsionspezialapparatur (DRP 712216) und der Pfeife vorgenommen. Die Energie und schließlich die Gesamtkosten, die zur Erzeugung von 1000 l Öl-Wasseremulsion erforderlich sind, wurden für das magnetostriktive Verfahren und die Pfeife berechnet. Ein genauer Vergleich mit einem piezoelektrischen Schwinger wurde nicht durchgeführt, da sein Nutzeffekt in der gleichen Größenordnung des Magnetostruktionsschwingers liegt und bei den außerordentlichen Unterschieden, die sich gegenüber der Ultraschallpfeife ergeben, nicht neues bringen würde.

Aus dem Vergleich ergibt sich folgendes Bild:

Die wesentliche wirtschaftliche Überlegenheit der Flüssigkeitspfeife gegenüber den bisher bekannten Ultraschall-Erzeugern beruht auf 3 Ursachen:

1. Findet in der Flüssigkeitspfeife eine direkte Umsetzung von mechanischer Strömungsenergie in mechanische Schwingungsenergie statt, also fällt der Umweg über den elektrischen Hochfrequenzgenerator mit allem Zubehör fort.

2. Sorgt die Pfeife infolge der aus ihr austretenden Strömung automatisch für eine hervorragende Durchmischung des zu beschallenden Gutes. Diese Durchmischung und die Schalleinwirkung ist besonders gut, wenn sich die Pfeife — wie z. B. bei der Emulsionsbereitung — in der einen Komponente (z. B. Wasser) befindet und mit der anderen Komponente (z. B. Öl) angeblasen wird. Es müssen dann alle Flüssigkeitsteilchen die Zone maximaler Schalleinwirkung (zwischen Düse und Schneide) passieren, was bei einem Magnetostruktionsschwinger nur durch spezielle Mittel zu erreichen ist.

3. Besteht das ganze Pfeifenaggregat nur aus einem kleinen Kompressor und der eigentlichen Pfeife, während die Magnetostriktionsapparatur aus Gleichrichteraggregat, Hochfrequenzgenerator mit großer Elektronenröhre, den zugehörigen Transformatoren und dem eigentlichen Magnetostruktionsschwinger besteht. Außerdem tritt noch der Aufwand der Gleichstromvormagnetisierung mit großer Drossel usw. hinzu.

Um einen gerechten Vergleich zu erzielen, wurde der elektrisch-akustische Nutzeffekt, das Verhältnis der erzeugten akustischen Leistung zur hineingesteckten elektrischen für 3 verschiedene Magnetostruktionsschwinger, einen Stabschwinger mit normalem glatten Kopf, einen solchen mit Spezial-emulsionskopf (nach DRP 712216) und einen in der Technik gebräuch-

Sender sowie für die Flüssigkeitspfeife bestimmt. Außerdem wurden Vergleichsmessungen anstellt über den Energieaufwand, der zur Erzeugung 1000 l Emulsion mit den 3 erstgenannten magnetostruktiven Generatoren sowie mit der Pfeife erforderlich ist. Über die rein akustischen Messungen wird an anderem Ort berichtet werden. Uns interessiert hauptsächlich der 2. Vergleich, der an einer praktischen Anwendung, der Emulsionsbildung, anstellt wurde. Da für die Emulgierung von Flüssigkeiten eine möglichst große Kavitationsbildung nötig wurden die magnetostruktiven Schallerzeuger durch Erhöhung der Hochfrequenzspannung bis zur intensiven Kavitation erregt.

Der zur Speisung der *Magnetostruktionschwinger* nutzte Hochfrequenzgenerator lieferte eine Hochfrequenzwirkleistung von 300 W. Setzt man einen gebauten Generator von 45% Wirkungsgrad voraus, so würde dieses einer Netzentnahme von 667 W entsprechen. Hierzu tritt die Leistung der sichstromvormagnetisierung des Schwingers mit 190 W. Bei den Versuchen wurden 40 cm³ Öl in 10 cm³ Wasser bei einer Behandlungsdauer von 5 min emulgiert. Zur Erzeugung von 440 cm³ einer 9%igen Emulsion wären demnach 300 · 870 = 261 000 W sec. oder für 1 l 593 000 W sec erforderlich. Die Angaben beziehen sich auf den oben genannten Spezialultrasonkopf. Die beiden anderen Schallerzeuger gaben eine schlechtere Ausbeute und brauchen demnach im Vergleich nicht berücksichtigt zu werden.

Die für die *Pfeife* aufgewandte Leistung N ergibt sich aus dem Anblas-Druck P in atm. und dem in der Sekunde ausströmenden Flüssigkeitsvolumen V_0 in cm³ $N = P \cdot V_0 \cdot 981 \cdot 10^3 \text{ erg/sec} = P \cdot V_0 \cdot 981 \cdot 10^{-4} \text{ W}$. Bei einem bestimmten Druck in der Zeiteinheit ausströmende Volumen wurde gemessen¹ und hieraus die Leistung N berechnet. Für eine Spaltdüse von 0,3 mm und einem Arbeitsdruck von 12 atü ergab sich $N = 190 \text{ W}$. Die Meßanordnung war so getroffen, daß sich die Pfeife in einem kleinen mit 7 l Wasser gefüllten Behälter befand. Die Pfeife selber war an einem Zylinder angeschlossen, der mit dem entsprechenden Öl gefüllt war, das durch einen Kolben in die Pfeife gedrückt wurde. Dieser Vorgang dauerte 25 sec. Um eine hochwertige Emulsion zu erhalten, wurde die erzeugte Emulsion noch 4 weitere Male durch die Pfeife gegeben, so daß sich insgesamt also 125 · 190 = 23 800 W sec ergeben. Die Emulsion wurde zentrifugiert und ihre Zusammensetzung zu 15% Ölgehalt bestimmt, was bei 4,7 l anfänglichen Wasservolumens eine endgültige Emulsionsmenge von 5,5 l ergibt. Die für 1 l Emulsion notwendige Energie betrug demnach 4330 W sec.

Der Vergleich zeigt, daß auf magnetostruktivem Wege im Endzustand eine 9%ige, mit der Pfeife aber mühelos eine 15%ige Emulsion erzielt werden konnte (s. auch Abb. 5), wobei noch keine Anzeichen zu erkennen waren, daß dieses für die Pfeife die endgültige Grenze sei. Versuche, die Konzentration weiter zu erhöhen, wurden bisher nicht unternommen, da sie für den Vergleich ohne Interesse waren.

Weiterhin ergibt sich, daß ganz abgesehen vom höheren Ölgehalt der Pfeifenemulsion, überdies der Energieaufwand der Pfeife gegenüber dem Magnetostruktionschwinger um den Faktor 4330 zu

593 000 oder 1:137 geringer ist. Wollte man versuchen, auch magnetostruktiv eine 15%ige Emulsion zu erreichen, so wäre dies nur mit einem erneuten Energieaufwand möglich, und das Verhältnis würde sich weiterhin zugunsten der Pfeife verschieben. Bei der unten aufgeführten Bilanz und der Darstellung in Abb. 7 ist also ganz unberücksichtigt geblieben, daß es sich bei der Pfeife um eine 15%ige, bei dem Magnetostruktionschwinger nur um eine 9%ige Emulsion handelt.

In einer leicht anzustellenden Rentabilitätsrechnung steigert sich das Verhältnis 1:137 zugunsten der Pfeife nochmals wesentlich. Dies liegt einerseits daran, daß der Magnetostruktionsender etwa 30mal

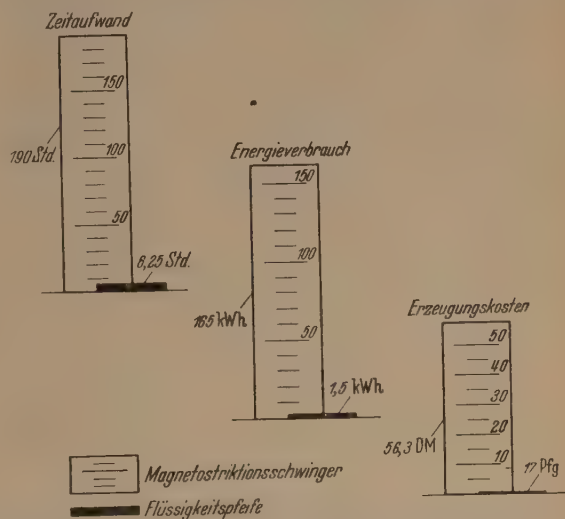


Abb. 7. Vergleich zwischen Ultraschallpfeife und Magnetostruktionschwinger bei der Herstellung von 1000 l Emulsion.

langsamer emulgiert als die Pfeife (5,3 l/Std. gegen 158 l/Std. s. oben) andererseits, daß bei der langsamen Emulgierung überdies sehr hochwertige Teile (Elektronenröhre usw.) abgenutzt werden. Es ergibt sich also folgendes Bild:

1. Magnetostruktionschwinger.

Herstellungsdauer für 1000 l bei Aufstellung von 30 Apparaturen von je 870 W Leistungsaufnahme 6,3 Std.

1. Energie für 1000 l Emulsion = 30 · 870 · 6,3 = 165 kWh à 0,04 l M. DM 6,60
 2. Amortisation für Elektronenröhren (600 DM je 3000 Std. Betriebsdauer) = 0,20 DM je Std. . 6,3 · 30 = DM 37,80
 3. Amortisation für die übrige Anlage, Hochfrequenzgenerator Schallschwinger usw. etwa 5500 DM in 10 Jahren = 0,063 DM/Std. · 6,3 · 30 DM 11,90
- Herstellungskosten für 1000 l Emulsion mit der Magnetostruktionsanlage DM 56,30

2. Pfeife.

Herstellungsdauer für 1000 l Emulsion bei Aufstellung von 1 Apparatur 6,35 Std.

1. Energie für 1000 l Emulsion = 4,33 · 10⁶ W sec = 1,2 kWh; bei 80% elektromechanischem Nutzeffekt des Kompressors, also 1,5 kWh à 0,04 DM DM 0,06
 2. —
 3. Amortisation für Anlage, etwa 1500 DM in 10 Jahren = 0,017 · 6,35 = DM 0,11
- Herstellungskosten für 1000 l Emulsion mit der Pfeife DM 0,17

¹ Bei 12 atü ausströmendes Volumen = 162 cm³/sec.

In bezug auf Rentabilität ist die Pfeife dem Magnetostruktionsschwinger also sogar um den Faktor 330 überlegen.

Arbeitslohn braucht in diesem Vergleich nicht berücksichtigt zu werden, da die Aufstellung auf gleiche Arbeitszeiten umgerechnet wurde. Im praktischen Betrieb wird der Vergleich allerdings noch günstiger für die Pfeife ausfallen, da zur Überwachung von 30 komplizierten Apparaturen sicher mehr Personal erforderlich ist, als für eine Umlaufapparatur. Wenn man auch daran denken könnte, weniger Magnetostruktionsapparaturen entsprechend größeren Ausmaßes aufzustellen, so würde das wahrscheinlich an der hier angegebenen Rentabilitätsrechnung wenig ändern, da solche Apparaturen auch entsprechend wertvoller wären.

Abb. 7 zeigt zusammenfassend den Vergleich von Zeitaufwand, Energieverbrauch und Erzeugungskosten zwischen der Ultraschallpfeife und dem Magnetostruktionsschwinger, bezogen auf die Herstellung von 1000 l Emulsion.

Bei den vorliegenden Versuchen der Emulsionserzeugung sollte es sich lediglich um eine Demonstration der industriellen Leistungsfähigkeit der

Ultraschallpfeife gegenüber den bisher gebräuchlichen Ultraschallschwingern handeln. Außerdem gestattet die Emulsionserzeugung quantitativ einen gerechten Vergleich anzustellen, wobei noch einmal darauf hingewiesen sein mag, daß sie nur als *Beispiel* gewählt wurde. Auch die sonst bekannten Ultraschallerscheinungen, wie Zerspritzen von Flüssigkeiten an der Oberfläche durch die Schallwirkung, Emulgieren von Flüssigkeiten und anderes mehr konnten bei der Pfeife beobachtet werden. Die Vermutung ist demnach nicht ganz von der Hand zu weisen, daß die Ultraschallpfeife nicht nur zur Emulsionserzeugung wertvoll sein dürfte, sondern auch zur Erzielung anderer Ultraschallwirkungen [3] herangezogen werden könnte, insbesondere derjenigen, die auf der heftigen Kavitation innerhalb der Ultraschallwelle beruhen, wie z. B. die Entkeimung von Flüssigkeiten und vieles andere mehr.

Literatur. [1] HARTMANN, J. and B. TROLLE: J. sci. Instrum. 4, 101 (1927). — HARTMANN, J.: Phil. Mag. 11, 92 (1931). — Phys. Rev. 20, 719 (1932). — J. Phys. Radium 123 (1935); 7, 49 (1936). — HARTMANN, J. u. E. v. MATHE: Akust. Z. 4, 126 (1939). — [2] EHRET, L. u. H. HAHNEMANN: Z. techn. Phys. 23, 245 (1942). — [3] HIEDEMANN, E.: Grundlagen und Ergebnisse der Ultraschallforschung. Berlin 1939. — BERGMANN, L.: Der Ultraschall, 3. Aufl. Berlin 1942.

Ponderometrische Bestimmung dielektrischer Größen*.

VON THEODOR GAST und ERIKA ALPERS.

(Aus dem Institut für technische Physik der Technischen Hochschule Darmstadt.)

Mit 8 Textabbildungen.

(Eingegangen am 18. Juni 1948.)

1. Übersicht.

Dielektrizitätskonstante (DK) und dielektrischer Verlustfaktor (DV) sind wichtige physikalische Meßgrößen. Sie können Aufschluß über die innere Struktur eines Materials geben und sind daher für die Erforschung und Entwicklung von Isolierstoffen von Bedeutung. Ihre Bestimmung in Abhängigkeit von Frequenz und Temperatur ist z. B. notwendig, wenn ein Werkstoff auf seine Brauchbarkeit als technisches Dielektrikum geprüft werden soll. Daher besteht der Wunsch nach Meßmethoden, die einen raschen Überblick über das dielektrische Verhalten eines Stoffes bei kontinuierlicher Änderung von Frequenz und Temperatur in weiten Bereichen gestatten. Die seither üblichen Meßverfahren waren auf bestimmte Frequenzen oder schmale Frequenzbereiche beschränkt, deren Wechsel apparative Änderungen bedingte. So ist z. B. die technisch in großem Umfang angewandte SOHERING-Brücke für 50 oder 800 Hz ausgelegt. Von der Frequenz prinzipiell unabhängig sind Kraftwirkungsmethoden, wie sie unter anderen BOLTZMANN zur DK-Bestimmung verwendete. Jedoch sind die dabei auftretenden Kräfte so klein, daß sie mit den bekannten Hilfsmitteln nur schwierig gemessen werden konnten. Diese Methoden waren daher für breitere Anwendung nicht geeignet. Mit

der vor einigen Jahren am Institut für technische Physik der Technischen Hochschule Darmstadt entwickelten elektrischen Mikrowaage liegt ein Gerät vor, das solche elektrostatischen Kräfte zuverlässig aufzuzeichnen gestattet. Hierdurch war es möglich, auf die klassischen Kraftwirkungsmethoden zurückzugreifen und auf ihrer Grundlage neue Verfahren zur Bestimmung von DK und dielektrischem Verlust zu schaffen. Über die Apparaturen und die damit durchgeführten Messungen wird nachstehend berichtet.

2. Grundlagen der ponderometrischen DK-Messung.

BOLTZMANN ermittelt die DK aus der Anziehungskraft, die ein Rotationsellipsoid durch eine geladene Kugel erfährt. Auch in der vorliegenden Arbeit wird aus der Kraft, die auf eine Probe im inhomogenen Feld ausgeübt wird, auf die DK geschlossen, und zwar wird eine kleine Probekugel im Feld einer Kugelskondensators verwandt. Für die DK gilt unter Verwendung des GIORGISCHEN Maßsystems folgend Gleichung [1]:

$$\varepsilon - 1 = \frac{K}{\varepsilon_0 V \left(\mathcal{E} \frac{d\mathcal{E}}{dr} \right) - \frac{K}{3}}$$

wobei ε_0 die DK des Vakuums, \mathcal{E} die Feldstärke, $d\mathcal{E}/dr$ den örtlichen Anstieg der Feldstärke, V das Volumen der Probe und K die Kraft bedeuten. Man erkennt, daß die Frequenz in der Gleichung nicht vorkommt, die Messung also frequenzunabhängig ist.

* Auszug aus der Dissertation von E. ALPERS: Dielektrische Eigenschaften aus Kraftwirkung, Darmstadt 1948. Die Verfasser möchten Herrn Prof. Dr. R. VIEWEG für die Förderung der Arbeit durch wertvolle Anregungen und Bereitstellung der experimentellen Hilfsmittel vielmals danken.

n aus apparativen Gründen wird man mit der nhlänge eine Größenordnung oberhalb des Kugelamessers bleiben müssen. Die untere Grenze die Frequenz ist durch die Zeitkonstante gea, die für das Abklingen einer elektrischen Erg infolge der Leitfähigkeit des Materials maßnd ist. Bei sehr niedrigen Frequenzen gelingt Aufbau eines inneren Feldes nicht. Die DK dann zu groß gemessen.

3. Apparatur.

ie auftretenden Kräfte werden mit einer Mikro- gemessen, die es gestattet, einige γ zu regi- ren. Sie wurde ursprünglich für Diffusions- ungen an Kunststoffmembranen entwickelt [2]. Abb. 1 und 2 zeigen Wirkungsweise und Schal- der elektrischen Waage. Die Last greift an m Waagebalken an, der an Spannbandern be- gt ist und eine Drehspule trägt. Diese dreht im Feld einer konstant erregten Spulen- anung nach HELMHOLTZ. Dem äußeren Feld ist hochfrequente Komponente überlagert, die in Drehspule eine winkelpportionale Wechsel- nung induziert. Diese wird verstärkt, gleich- chet und über einen Gleichstromverstärker derart ie Drehspule zurückgeführt, daß das entstehende amoment dem Lastmoment entgegenwirkt und st völlig ausgleicht. Der Strom durch die Dreh- e ist dann der Last proportional. Er kann an- igt und registriert werden. Ein Gewicht von γ bewirkt einen Strom von 3 mA, der dem Voll- chlag eines handelsüblichen Linienschreibers von mm Papierbreite entspricht.

Mechanisch ist die Waage folgendermaßen auf- aut. Das bewegliche System befindet sich in m Kreuz aus Glasschliffen. Das Spannband ist Kernschliffen aus Metall befestigt. Der Waage- ken besteht aus Glas. Die Last, deren Grund- tag weniger interessiert als ihre im Meßvorgang hrene Gewichtsänderung, wird in ein Häkchen vorderen Ende eingehängt und durch ein Schie- richt kompensiert, dessen Lage man durch einen chstropfen fixiert. Der Nullpunkt kann durch hen der Kernschliffe fein eingestellt werden.

Abb. 3 zeigt, wie diese Waage zur Bestimmung DK verwandt wird. Am Waagebalken hängt an m Quarzfaden die Probe, die sich im Feld des gelkondensators befindet, auf dessen untere Hälfte zichtet werden kann. Die Abmessungen sind so ählt, daß bei einer Spannung von 1000 V, die n ohne allzu großen Aufwand in einem größeren equenzbereich erzeugen kann, auf eine Probe, die in gegen die Felddimensionen ist, gut meßbare äfte ausgeübt werden.

Für Frequenzen zwischen 50 Hz und 250 kHz nd ein RC-Summer zur Verfügung, dessen Aus- gsspannung von 30 V über einen Verstärker eine nderöhre mit OHmschem Ausgangswiderstand steu- e. Frequenzen von 1, 10 und 100 MHz wurden mit hrensändern erzeugt. Die Spannungsmessung er- ge mit einem Diodenvoltmeter. Da auch die mperaturabhängigkeit der DK untersucht werden lte, wurden die beiden Halbkugeln doppelwandig egeführt und der so gebildete Mantelraum geheizt er gekühlt. Gegen Luftströmungen im Labora-

torium und Wärmeströmungen wurde der Faden, an dem die Probe hängt, durch ein Rohr mit horizon- talen Blenden geschützt.

4. Messungen und Ergebnisse.

Die Messungen sollten in erster Linie die Brauch- barkeit der Methode aufzeigen. Sie wurden im wesent-

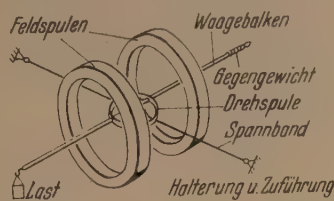


Abb. 1. Grundsätzliche Wirkungsweise der elektrischen Torsionswaage.

lichen an Proben aus Polyvinylchlorid mit Weich- macher und Phenolharz mit Holzmehl durchgeführt, d. h. an Stoffen, deren dielektrisches Verhalten schon

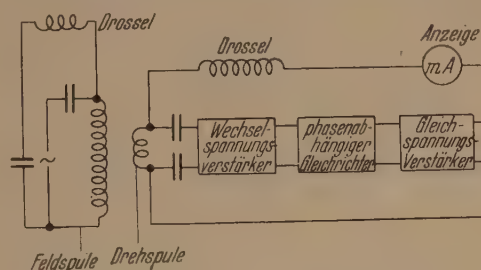


Abb. 2. Grundsätzliche Schaltung der elektrischen Waage.

sehr eingehend untersucht ist. Die Proben aus Polyvinylchlorid mit Weichmacher waren durch plastische Verformung bei erhöhter Temperatur in einer sphärischen Hohlform aus Metall hergestellt

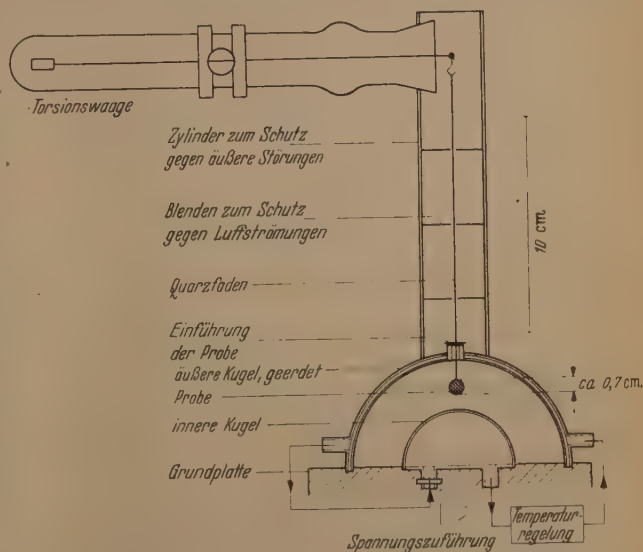


Abb. 3. Anordnung zur Bestimmung der Dielektrizitätskonstante.

worden. Ihr Durchmesser betrug 7 mm. Aus Phenol- harz mit Holzmehl konnten Kugeln gleichen Durch- messers auf der Drehbank angefertigt werden. Für beide Proben wurden einmal die Temperaturabhängig- keit der DK im Bereich von -50 bis 150°C bei konstanten Frequenzen von 50 Hz, 1, 10 und 100 MHz und zweitens die Frequenzabhängigkeit im Bereich von 50 Hz bis 250 kHz bei Temperaturen von 25, 35, 50 und 60°C gemessen.

Die Auswertung der Ergebnisse ist auf 2 Weisen möglich. Die Bezifferung der Ordinatenachse in DK-Werten läßt sich einmal ohne Kenntnis der Feldstärke sowie ihres Gradienten gewinnen. In dem hyperbolischen Ausdruck für die DK sind außer \mathcal{E} und $d\mathcal{E}/dr$ alle Parameter gegeben. Da die Probe ihren Ort im Kugelfeld beibehält, sind sowohl die Feldstärke als auch ihr Gradient und damit das Produkt aus beiden konstant. Ermittelt man für eine bestimmte Frequenz etwa durch Brückenmessungen die zugehörige DK, dann läßt sich aus

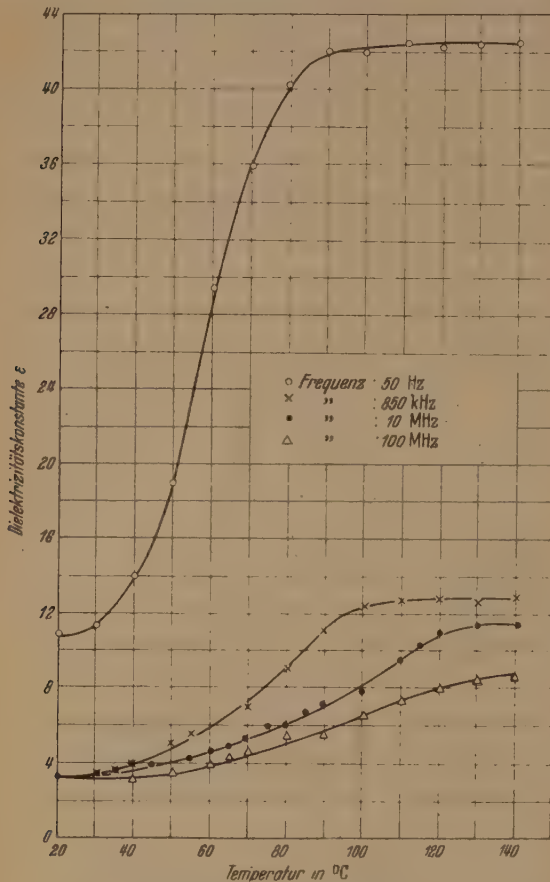


Abb. 4. Dielektrizitätskonstante in Abhängigkeit von der Temperatur. (Polyvinylchlorid mit Weichmacher.)

der Kraft ($\mathcal{E}d\mathcal{E}/dr$) berechnen und zur Ermittlung einer ϵ -Teilung der Ordinatenachsen verwenden. Andererseits kann man aber auch ϵ aus den Feldgrößen bestimmen und damit die DK absolut nach obiger Formel berechnen. Brückenmessungen sind als Vergleichsmessungen nützlich. Die im folgenden verzeichneten Ergebnisse wurden auf die 2. Art ausgewertet.

Die Abb. 4 und 5 zeigen Meßergebnisse für Polyvinylchlorid mit Weichmacher. Entsprechende Kurven ergaben sich auch bei Phenolharz mit Holzmehl. Man erkennt deutlich das Gebiet der anomalen DK-Dispersion, das in Bild 4 bei höheren Frequenzen nach höheren Temperaturen und in Bild 5 bei höheren Temperaturen nach höheren Frequenzen hin verschoben ist. Der Kurvenverlauf und die erhaltenen Ergebnisse stimmen mit Angaben in der Literatur überein und können mit Hilfe bekannter Theorien gedeutet werden [3].

Die Berechnung der Fehlermöglichkeiten ergab, daß bei einer bestimmten Spannung der maximale

Fehler von der Größe der DK abhängt. Er bet. z. B. 5% für kleine DK-Werte ($\epsilon = 2,5$) und 2% für hohe DK-Werte ($\epsilon = 20$). Eine Präzisionsmessung der DK ist also mit vorliegender Apparatur möglich. Sie eignet sich jedoch gut dazu, schon einen Überblick über Frequenz- und Temperaturabhängigkeit der DK in weiten Bereichen zu gewinnen. Auch haben die durchgeführten Versuche bewiesen, daß die gefundenen Kurven recht reproduzierbar sind.

5. Grundlagen der DV-Bestimmung.

Die Ermittlung der DK in Abhängigkeit von Frequenz und Temperatur läßt Schlüsse auf die I

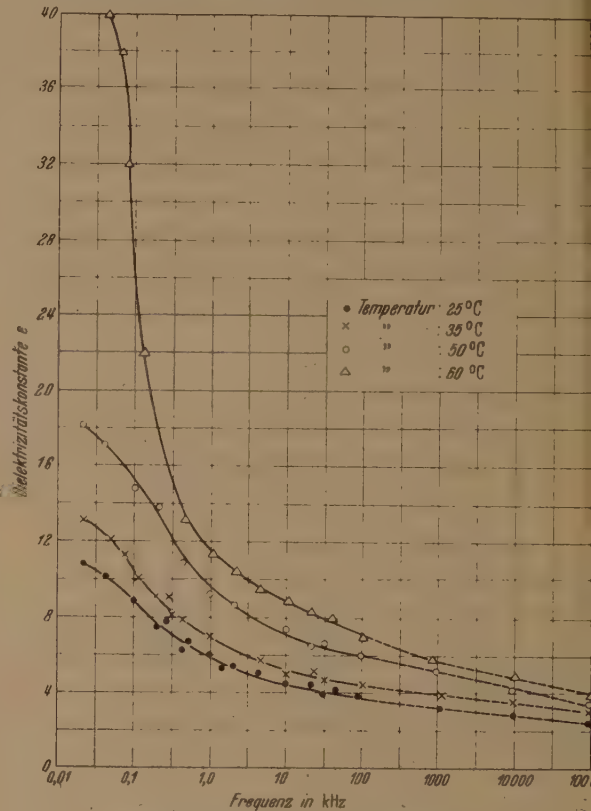


Abb. 5. Dielektrizitätskonstante in Abhängigkeit von der Frequenz. (Polyvinylchlorid mit Weichmacher.)

des Verlustmaximums zu. Die Größe der dielektrischen Verluste muß jedoch besonders bestimmt werden. Hierzu wird ebenfalls eine ponderometrische Methode verwandt [4]. In einem elektrostatischen Drehfeld, das durch Superposition zweier gekreuzphasenverschobener Wechselfelder entsteht, erfährt eine Probe aus verlustbehaftetem Material ein Drehmoment, das ein Maß für die dielektrischen Verluste ist. Ein solches Drehfeld kann durch ein reelles Drehzeigerbild wiedergegeben werden, in dem der Vektor \mathcal{E} rotiert; ihm eilt die dielektrische Verschiebung ϑ um den Verlustwinkel δ des Dielektrikums nach. Der Verlustfaktor $\tan \delta$ kann aus Drehmoment M , Feldstärke \mathcal{E} , Volumen der Probe V und DK ϵ berechnet werden.

$$\tan \delta = \frac{9}{2} \frac{\epsilon_0 \cdot V \mathcal{E}^2}{\epsilon M} \pm \sqrt{\left(\frac{9}{2} \frac{\epsilon_0 \cdot V \mathcal{E}^2}{\epsilon M} \right)^2 - 1} - \frac{4}{\epsilon} - \frac{4}{\epsilon^2}$$

Von den beiden Lösungen der Gleichung ist nur diejenige brauchbar, die mit wachsendem M größer wird. Auch hier geht die Frequenz nicht in die Rechnung ein.

Mit dieser Methode sind also grundsätzlich Messungen in Abhängigkeit von der Frequenz möglich.

6. Die Apparatur.

Für die Anzeige der Drehmomente wurde ebenfalls die elektrische Mikrowaage, dieses Mal als Drehmomentenmesser, verwendet. Abb. 6 zeigt die Versuchsanordnung. Die scheibenförmige Probe ist mit einer kleinen Drehspule verbunden und auf einer vertikalen Achse drehbar an Spannbändern befestigt, die gleichzeitig als Stromzuführung dienen. Die Drehspule befindet sich wieder im homogenen Feld einer festen Spulenanordnung. Gleichzeitig mit der Probe dreht sich auch die Spule, wobei in ihr winkelproportionale Wechselspannungen erzeugt werden. Verstärkung, Gleichrichtung, Kompensation und Anzeige der Momente können mit den gleichen Bauelementen geschehen wie bei der DK-Messung. Da nur kleine Kräfte auftreten, war eine Registrierung mit dem Tintenschreiber nicht möglich. Es wurde daher ein sehr viel empfindlicherer Lichtlinienschreiber¹ verwandt, der mit Hilfe von Vor- und Nebenwiderständen an die Apparatur angepaßt wurde. Ein Ausschlag auf dem Schreiber von 1 mm entspricht ein

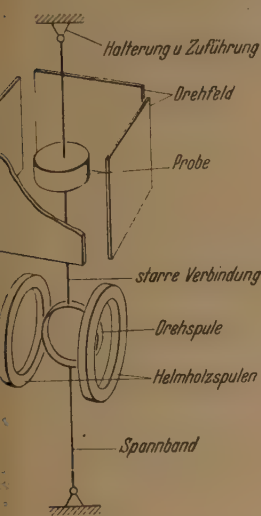


Abb. 6. Anordnung zur Bestimmung des dielektrischen Verlustfaktors.

Drehmoment von $7,5 \gamma$ cm. Das Feldsystem besteht aus 4 Glasplatten, die mit Stanniol belegt und auf einer Hartpapierplatte so angeordnet sind, daß sie einen oben offenen Würfel bilden. An je zwei gegenüberstehende Platten werden die um 90° phasenverschobenen Spannungen angelegt. Die Spannungen lieferte ein Schwebungssummen, dem zwei um 90° phasenverschobene Wechselspannungen von 30 V für einen Frequenzbereich von 25 Hz bis 10 kHz entnommen werden konnten. Sie wurden mit Hilfe einer Gegentaktschaltung auf 1000 V verstärkt. Für die Messung der Temperaturabhängigkeit der dielektrischen Verluste war auf dem Boden eine Heizspirale untergebracht.

Zur Eichung der Apparatur diente ein kleiner Spiegel oberhalb der Probe. Die Drehmomente wurden gleichzeitig mit Hilfe eines Lichtzeigers und mit dem Lichtlinienschreiber gemessen.

7. Messungen und Meßergebnisse.

Der DV wurde an scheibenförmigen Proben aus Polyvinylchlorid mit Weichmacher bestimmt. Es wurden einmal die Abhängigkeit des Verlustfaktors von der Temperatur bei Frequenzen von 50 und 300 Hz, zum anderen die Abhängigkeit des Verlustfaktors von der Frequenz bei Temperaturen von 30° und 50° C gemessen. Die Abb. 7 und 8 zeigen Ergebnisse. Das Maximum der Verluste stimmt mit der

stärksten Änderung der DK überein. Auch hier sind die Kurven bei höheren Frequenzen (Abb. 7) (bzw. Temperaturen bei Abb. 8) nach höheren Temperaturen (Frequenzen) hin verschoben. Bei niederen Frequenzen ist ein nochmaliges Ansteigen der Kurven zu beobachten, das, ebenso wie die sehr hohen

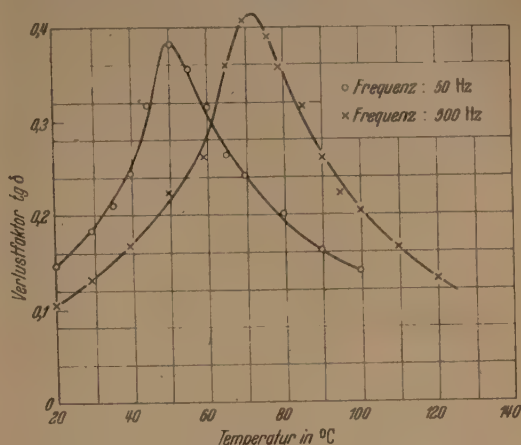


Abb. 7. Temperaturabhängigkeit des Verlustfaktors. (Polyvinylchlorid mit Weichmacher.)

Verluste und — scheinbar — sehr großen DK-Werte bei niederen Frequenzen auf Leitfähigkeitseinflüsse zurückzuführen ist.

Der maximale Fehler bei der Verlustmessung ist wie der Fehler der DK von der DK der Probe abhängig. Er ändert sich zwischen 10 und 50% für Bereiche von ϵ zwischen 1 und 20.

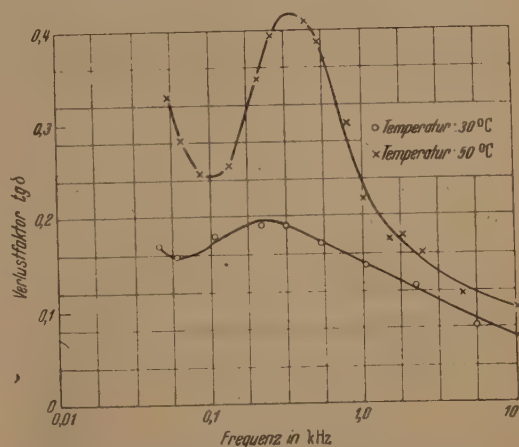


Abb. 8. Frequenzabhängigkeit des Verlustfaktors. (Polyvinylchlorid mit Weichmacher.)

Das Verfahren zur Messung der dielektrischen Verluste ist noch nicht soweit durchgebildet wie die Methode zur DK-Messung. Die apparativ bedingten Meßfehler sind deshalb größer, zumal die zu messenden Drehmomente sehr klein sind. Außerdem ist die Auswertung schwierig. Ein Nachteil der Methode ist ferner, daß die Werte für die DK in die Berechnung von $\tan \delta$ eingehen, man also an eine zusätzliche Bestimmung der DK gebunden ist. Trotzdem ist die Apparatur in ihrem jetzigen Entwicklungsstadium geeignet, einen Überblick über die dielektrischen Verluste bei verschiedenen Werkstoffen zu geben. Die Genauigkeit der Drehmomentmessung könnte allerdings noch durch Änderung der Spulendaten wesentlich erhöht werden.

¹ Hersteller: Hartmann und Braun A.G. Frankfurt a. M.

Ausblick.

Grundsätzlich dürfte der Frequenzbereich bei der DK-Messung nach oben bis ins Gebiet der Zentimeterwellen ausdehnbar sein, da man geeignete elektrische Felder in Hohlraumresonatoren leicht erzeugen kann. Schwieriger dürfte die ponderometrische Bestimmung der dielektrischen Verluste bei so kurzen Wellen sein, doch scheint auch diese Aufgabe lösbar.

Zusammenfassung.

Es wird über Kraftwirkungsmethoden zur Bestimmung von Dielektrizitätskonstante und dielek-

trischem Verlustfaktor berichtet. Die Grundlagen werden dargelegt, die Meßapparaturen beschrieben und erste Meßergebnisse mitgeteilt. Die Meßverfahren sind geeignet, rasch einen Überblick über die dielektrischen Eigenschaften in Abhängigkeit von Frequenz und Temperatur zu gewinnen.

Literatur. [1] BECKER, R.: Theorie der Elektrizität 11. Aufl., Bd. I, S. 88. Leipzig 1941. — [2] VIEWEG, R. u. GAST: Kunststoffe, **34**, 117 (1944). — [3] MÜLLER, F.: Ergebn. exakt. Naturw. **17**, 164 (1938). — [4] LERTES, Z. Phys. **6**, 56 (1921). — Phys. Z. **22**, 621 (1921).

Berichte.

Die physikalischen Grundlagen und die technischen Hilfsmittel der Sonnenbeobachtung.

Von VICTOR VON KEUSSLER, Freiburg i. Br.

(Eingegangen am 13. September 1948.)

Seit der zweiten Hälfte des vorigen Jahrhunderts hat sich die Sonnenforschung aus den ersten Anfängen heraus immer rascher weiterentwickelt. In neuerer Zeit ist sie insbesondere für die Nachrichtenübermittlung von sehr großer Bedeutung. Die drahtlose Übertragung mit geringem Aufwand wird durch das Vorhandensein der Ionosphäre ermöglicht, deren Zustand durch die auf der Sonne sich abspielenden Vorgänge bedingt ist. Darauf ist zurückzuführen, daß der Sonnenforschung seit 10 Jahren eine besondere Beachtung zu Teil geworden und eine regelmäßige Überwachung der solaren Vorgänge und aller mit diesen parallel verlaufender Erscheinungen in die Wege geleitet worden ist. In Deutschland wurde das FRAUNHOFER-Institut in Freiburg i. Br. ins Leben gerufen, das mit seinen Außenstationen in Zusammenarbeit mit den wichtigsten Observatorien und Sternwarten des europäischen Kontinents einen regelmäßigen Sonnenüberwachungsdienst durchgeführt hat. Es setzt auch heute seine Sonnenüberwachung weiter fort.

Die bisher ermittelte bzw. wahrscheinlich gemachte Korrelation zwischen solaren und terrestrischen Erscheinungen hat KIEPENHEUER (1948 [29]) in übersichtlicher Weise graphisch dargestellt. Demnach können nicht nur aus den Vorgängen auf der Sonne auf solche auf der Erde, sondern auch umgekehrt aus dem Zustand der Ionosphäre und anderer durch die Sonnentätigkeit bedingter Phänomene auf den Zustand der Sonne Rückschlüsse gezogen werden. Die gleichzeitige Beobachtung entsprechender irdischer Erscheinungen ist daher auch für die reine Sonnenforschung von größter Wichtigkeit. Das ist Aufgabe besonderer ionosphärischer, magnetischer und anderer Beobachtungsstationen. Vielversprechend für die Zukunft ist die kürzlich entdeckte Sonnenstrahlung im Gebiet der Zentimeter- und Meterwellen (PAWSEY, PAYNE-SCOTTS und MCCREADY 1946 [52]; auch SCHOTT 1947 [58]). Die Meterwellenstrahlung steht in engem Zusammenhang mit der Sonnenaktivität und stellt so ein neues Maß für diese dar. Sie wird bereits regelmäßig überwacht; die Methodik ihrer Messung ist noch im Entstehen begriffen. Im nachfolgenden soll über die Grundlagen

der Sonnenbeobachtung im Lichte optischer Wellenlängen und die in den letzten 20 Jahren erzielten methodischen Fortschritte berichtet werden.

I. Ziele und Aufgaben.

In Hinblick auf die örtliche Lage der Objekte auf der Sonne und die zur Anwendung gelangenden Methoden können die Ziele und Aufgaben der photographischen und visuellen Sonnenbeobachtung folgendermaßen zusammengefaßt werden:

1. Beobachtungen der Sonnenscheibe im integrierten Licht,
2. Beobachtungen der Sonnenscheibe im Licht bestimmter Absorptionslinien,
3. Sonnenkorona,
4. Protuberanzen,
5. Magnetfelder auf der Sonne.

Für jede entsprechende Gruppe von Erscheinungen sind besondere Beobachtungsmittel und Methoden ausgebildet worden. Die Anwendungsgebiete einzelner Apparate überdecken sich teilweise.

II. Störende Einflüsse.

Die die Sonnenüberwachung beeinträchtigenden Umstände sind vorwiegend durch den Zustand der Atmosphäre, zum geringen Teil durch andere Ursachen bedingt.

1. Bewölkung des Himmels.

Da auch in klimatisch günstigen Gegenden der Himmel oft ganz oder teilweise durch Wolken überdeckt ist, kann eine einigermaßen lückenlose Sonnenüberwachung nur bei Benutzung einer Reihe von Beobachtungsstationen durchgeführt werden. Durch Verlagerung stark bewölkter bzw. nahezu wolkenloser Gebiete wird aber oft beim Ausfall einer Station ein anderes freigegeben, so daß eine verhältnismäßig geringe Anzahl Stationen genügen kann. Während des Krieges war es möglich, mit vier in Mitteleuropa gelegenen Stationen zu einem nahezu lückenlosen Beobachtungsmaterial (abgesehen von den besonders schwierigen Koronaaufnahmen) zu gelangen, wobei eine Aufnahme je Tag verlangt wurde (KIEPENHEUER [29], daselbst graphische Darstellung). Die Zahl der für die Sonnenbeobachtung günstigen Tage ist b

hgebirgsstationen, die oft die Wolkendecke über-
n, unter Umständen besonders groß. Doch können
hgebirgsstationen wegen Bildung einer „Mütze“
Folge der Aufwindkondensation auch wesentlich
ünstiger als Talstationen sein.

2. Undurchlässigkeit der Atmosphäre.

Das Sonnenspektrum ist nach kurzen Wellen-
gen durch eine Absorptionsbande des Ozons ziem-
scharf begrenzt. Schon lange vor Erreichen dieser
nze wird die Sonnenstrahlung bedeutend ge-
wächt. Bei 3940 Å wird bei senkrechtem Durch-
g durch die Atmosphäre bereits die Hälfte der
ahlung absorbiert. An die Ozonabsorption schließt
a die sich weit ins Ultraviolett erstreckende Ab-
ption des Sauerstoffes an, wobei zwischen den
den Absorptionen nur eine flache Einsattelung bei
va 2100 Å entsteht. Bei Versuchen mit V_2 -Ge-
ossen in den USA ist es vorerst gelungen, das
nnenspektrum in einer Höhe von 155 km bis
0 Å mit Spuren bis zu 2230 Å zu photographieren
OPFIELD und CLEARMAN 1948 [23]). Auf die
ission der Sonne im kurzwelligen Ultraviolett
nn aus dem Zustand der Ionosphäre — der sie erzeu-
nde Bereich der Sonnenstrahlung erstreckt sich
gefähr von 600 Å bis 900 Å — geschlossen werden.
r ultrarote Teil des Sonnenspektrums wird, ab-
sehen von schmalen terrestrischen Absorptions-
ien, nur durch den in der Atmosphäre enthaltenen
asserddampf geschwächt.

3. Luftunruhe.

Die Temperaturverteilung in der Luft ist unter
m Einfluß der unregelmäßig erwärmten Erdober-
iche weitgehend inhomogen. Es entstehen sich
ehr oder weniger schnell fortbewegende Schichten
rschiedenen Brechungsvermögens (Schlieren). Da-
er ist jedes Sonnenbildelement schnellen Schwan-
ngen unterworfen (Szintillation), wodurch im Mittel
ne Unschärfe entsteht. Diese sog. Luftunruhe ist
auptsächlich für Zwecke der Sternastronomie bei
acht untersucht worden. Infolge der starken Heiz-
irkung der Sonne ist aber die Luftunruhe bei Tage
sonders groß. Dabei beträgt die Unschärfe bei
age gewöhnlich etwa 5'', bei besonders günstigen
mständen 1—2'', kann aber, allerdings selten,
is zu 20'' erreichen, während die Luftunruhe bei
Nacht etwa 5—10mal kleiner ist. Am günstigsten
r Sonnenaufnahmen ist die Zeit bald nach Sonnen-
ufgang und kurz vor Sonnenuntergang. Bei starker
szintillation machen sich sowohl am Sonnenrande,
ls auch auf der Sonnenscheibe mehr oder weniger
egelmäßige Pulsationen bemerkbar, so daß man von
„Szintillationswellen“ sprechen kann. Eine wellen-
örmige Pulsation erfolgt, wenn die Größe der vorbeie-
iehenden Schlieren mit derjenigen des Objektivs
ergleichbar ist. Sind die Schlieren klein, so wird
das ganze Bild unscharf. Sind sie groß im Vergleich
zum Objektiv, so verschiebt sich das ganze Sonnen-
bild.

Nach GALLISSOT und BELLEMIN (1927 [11]) können
weit entfernte Schlieren mit Hilfe einer Modifikation
der bekannten TÖPLERSchen Methode, die in der Nähe
des Objektivs befindlichen durch Abbildung des Ob-
jektivs mittels einer Linse in der Bildebene auf
einem Schirm sichtbar gemacht werden. Bei Anwen-

dung der Methode auf die Sonne wird ein kleiner Teil
des Sonnenrandes ausgeblendet und als Bild benutzt.
Die räumliche Ausdehnung der Schlieren in den
höheren Atmosphärenschichten und ihre Höhe ist von
MINNAERT und HOUTGAST (1935 [46]) durch Be-
obachtung des Sonnenrandes bei durch verschiedenen
große Blenden abgedecktem Objektiv, die Geschwin-
digkeit der Schlieren durch Projektion des Sonnen-
randes auf eine rotierende Registriertrommel ge-
schätzt worden. Der Durchmesser der Schlieren
wurde zu etwa 10 cm bestimmt. An einem der Be-
obachtungstage erhielten sie für die vertikale Höhe
der Schlieren, zwei verschiedenen Luftströmungen
entsprechend, 600 und 2600 m, für die Winkel-
geschwindigkeit der Schlieren 0,006 rad/sec. Neuer-
dings haben SIEDENTOPF und WISSHAK (1948 [60])
die durch die Luftunruhe verursachte Szintillation
einer irdischen Lichtquelle (Scheinwerfer in 1000 m
Entfernung) unter Zuhilfenahme einer lichtelektri-
schen Anordnung mit Kathodenstrahloszillographen
gemessen und die mittlere Frequenz als zwischen
10 und 30 Hz liegend konstatiert. Der Tagesgang des
durch die Luftunruhe bewirkten Modulation hat nach
ihren Messungen 2 Minima, eines kurz nach Sonnen-
aufgang und eines vor Sonnenuntergang, ferner ein
steiles Mittagsmaximum und ein flaches abendliches
Maximum.

Der erfahrungsgemäß sehr bedeutende in erster
Linie von der Erwärmung der Apparate, des Ge-
bäudes und des Erdbodens durch die direkte Sonnen-
strahlung herrührende Einfluß des Luftzustandes in
unmittelbarer Nähe der Beobachtungsanlage kann in
dem in sonstiger Hinsicht günstigem Hochgebirge
infolge der viel geringeren Schwächung der Wärme-
strahlung der Sonne durch die Atmosphäre viel
stärker sein. Um die Störungen durch die Luftunruhe
auf ein Minimum herabzusetzen, sind massive Bauten
zu vermeiden, die Erdbodenerwärmung ist durch An-
pflanzungen zu verhindern. Wind (auch künstlicher!)
übt eine günstige Wirkung aus, indem er die Schlieren
fortbläst. So hat LYOR (1945 [35]) vorzügliche Auf-
nahmen der Granulation erhalten, während der Wind
gerade gegen das Objektiv gerichtet war.

4. Atmosphärisches Streulicht.

Infolge der Beugung des Sonnenlichtes an den in
tieferen Atmosphärenschichten stets vorhandenen
suspendierten Teilchen (Dunstpartikel von der Größe
einiger μ , Wassertropfchen und feine Eiskristalle von
5—50 μ) wird die Sonne durch Streulicht über-
lagert, das sich außerhalb der Sonnenscheibe als eine
weißliche Aureole bemerkbar macht. Die Ausdehnung
dieser Aureole außerhalb des Sonnenrandes ist der
Größe der Teilchen etwa umgekehrt proportional und
variiert zwischen 5 und 10'. Da ihre Intensität unter
gewöhnlichen Verhältnissen wenige Hundertstel der
Sonnenhelligkeit beträgt, wird die Beobachtung der
Sonnenscheibe durch sie nicht beeinflußt. Hingegen
erschwert und sogar die bloße Wahrnehmung der
Korona durch die Existenz dieser Streulichtaureole
völlig unmöglich gemacht.

Durch Beobachtungen im Gebirge wurde fest-
gestellt, daß Staubteilchen von den durch die Auf-
heizung des Bodens durch die Sonnenstrahlung ver-
ursachten Luftströmungen hochgetragen werden.

Durch wärmere Luftschichten wird der Aufstieg abgebremst, wobei die Teilchen sich nach allen Richtungen ausbreiten und eine bräunliche Horizontalschicht bilden. Die höchste im Sommer erreichte Höhe liegt zwischen 2500 und 3000 m über Meeresspiegel. Das macht die Beobachtung der Sonnenkorona in großen Höhen möglich. Sämtliche der wenigen Korona-beobachtungsstationen liegen im Hochgebirge. Vorbereitende Versuche, die Sonne vom Flugzeug aus in großer Höhe zu beobachten, um täglich die für die Ionosphärenüberwachung wichtigen Aufnahmen zu erhalten, wurden während des Krieges in Deutschland ausgeführt und sollen gezeigt haben, daß die Stabilisierung von Apparaten mit Hilfe von Kreisel- und Photozellen auf genügend großen Flugzeugen möglich ist.

5. Erwärmung der Apparate.

Die in vielen Fällen sehr nachteilige übermäßige Erwärmung der der Sonnenstrahlung ausgesetzter Apparateile wird durch Schutzblenden und Filter (SCHOTTsches Wärmefilter BG 19) verhindert. Brennweitenänderung der Zölostaten Spiegel durch thermische Deformation macht eine Nachregulierung während der Beobachtung oft unvermeidlich. Zur Vermeidung übermäßiger Erwärmung ist es ratsam, die Zölostaten Spiegel ausschließlich während der Beobachtung der Strahlung auszusetzen. In neuerer Zeit wird Spezialglas (z. B. Tempaxglas) mit besonders niedrigem Ausdehnungskoeffizienten als Material für Zölostaten Spiegel verwendet.

6. Streulicht in den Apparaten.

Es gehört zu den Besonderheiten der Sonnenbeobachtung, daß das auszusondernde Licht, in dem die Beobachtung erfolgt, meist sehr schwach im Vergleich zur Gesamtstrahlung ist. Darum muß dem Schutze gegen Streulicht besondere Aufmerksamkeit zugewendet werden.

III. Apparate und Methoden.

Neben den weitgehend durchgebildeten photographischen und visuellen Methoden sind lichtelektrische an die Fernsehtechnik sich anlehrende Verfahren für spezielle Zwecke im Entstehen begriffen, deren Entwicklung sich jedoch im Anfangsstadium befindet.

1. Sonnenkamera.

Die Struktur der tiefen Schichten der Sonnenatmosphäre, der das kontinuierliche Spektrum, auf dem die FRAUNHOFERSchen dunklen Absorptionslinien erscheinen, aussendenden Photosphäre (Sonnenflecken, Granulation) tritt auf Aufnahmen in allgemeinem Licht hervor. Die Belichtungszeiten müssen viel kürzer als die Periode der Luftunruhe, jedenfalls kleiner als $\frac{1}{100}$ sec sein. Der Objektivdurchmesser darf die Ausdehnung der Luftschlieren (etwa 10 cm) nicht wesentlich überschreiten, muß aber, damit die erforderliche Auflösung von 1'' noch möglich ist, nicht erheblich kleiner als 10 cm sein. Die untere Grenze der Größe des Sonnenbildes ist durch die Körnigkeit der photographischen Platte bestimmt. Bei den heute gebräuchlichen Emulsionen sind Strukturen bis zu einer Größe von 0,01–0,02 mm erfaßbar, was zu einem Sonnenbilddurchmesser von 10–20 cm führt.

Eine Anordnung zur Aufnahme der Sonne in allgemeinem Licht (Sonnenkamera) besteht aus einem

Objektiv, dem eine photographische Platte gegenübersteht, vor der sich ein hochwertiger Verschuß befindet. Sie kann als Fernrohr, Turmteleskop oder Horizontalkamera mit davorstehendem Zölostaten ausgebildet sein. Zur Vermeidung großer Brennweiten wird das vom Objektiv entworfene Sonnenbild durch ein zweites optisches System vergrößert abgebildet. Diese Form der Sonnenkamera, bei der sich ein Schlitzverschuß in der Ebene des primären Sonnenbildes befindet, wird bei Aufnahmen von Sonnenflecken benutzt.

Zur Bestimmung von *Fleckenrelativzahlen* sind äußerst kontrastreiche Aufnahmen erforderlich. Es werden daher in neuerer Zeit ausschließlich sehr harte Platten (z. B. Agfa Printon-Platten) bei entsprechender Entwicklung benutzt, die gleichzeitig sehr feinkörnig sind. Da, wie sich, zumal bei starker Luftunruhe, gezeigt hat, kleine Flecken (Poren), gerade wegen der durch die Luftunruhe hervorgerufenen Szintillation, viel leichter visuell in dem auf einem Schirm projizierten Sonnenbild zu erkennen sind, erfolgt auf den Stationen des FRAUNHOFER-Instituts die Auszählung der Relativzahlen meist unter Projektion der Sonne auf einen weißen Schirm.

Besonders schwierig sind Aufnahmen der photosphärischen *Granulation*. Gegenüber den vorzüglichen Aufnahmen aus der Zeit um die Jahrhundertwende (JANSEN, HANSKY, CHEVALIER) sind erst vor nicht langer Zeit einige Fortschritte erzielt worden. Die dabei zu beachtenden von TEN BRUGGENCATE (1938 [5]) auf Grund seiner jüngsten und früher am EISENSTEIN-Turm in Potsdam gewonnenen Erfahrungen (TEN BRUGGENCATE und GROTRIAN 1936 [6]; TEN BRUGGENCATE, GROTRIAN und v. D. PAHLEN 1938 [7]) angeführten Gesichtspunkte sind folgende:

a) Die Zölostaten Spiegel dürfen zur Vermeidung der Deformation durch Erwärmung nur kurz vor und kurz nach der Aufnahme den Sonnenstrahlen ausgesetzt werden und müssen während der übrigen Zeit durch einen im Kuppelspalt angebrachten Vorhang geschützt sein.

b) Infolge geringerer Empfindlichkeit des Luftbrechungsindex weisen Aufnahmen im Ultrarot (Max. bei 7000 Å) mehr Einzelheiten auf. Andererseits ist es wichtig, die Gegend des Scheitelpunktes der Farbenkurve des Objektivs (gewöhnlich im Violett) auszufiltern. Nötigenfalls ist man auf einen Kompromiß angewiesen.

c) Die Anpassung des Objektivdurchmessers an die Größe der Luftschlieren ist besonders wichtig. Die größte Ausbeute an wirklich guten Aufnahmen (bei gutem Luftzustand nur 5%!) wurde bei Abblendung des Objektivs auf 10 cm Durchmesser erzielt, trotzdem bei der Größe der Beugungsbilder (etwa 1'') mit derjenigen der Granulationselemente (1–2'') vergleichbar ist. Sie nahm mit zunehmender Öffnung rapide ab. Die Belichtungszeit betrug $\frac{1}{1000}$ sec.

d) Die Struktur der Penumbra großer Flecken geht bei zu hartem Arbeiten leicht verloren. Als feinkörniges photographisches Aufnahmematerial vom erforderlichen Härtegrad hat sich Agfa Isopan FF-Film ($\frac{10}{10}$ Din) bei 6 Min. Entwicklung in Rodinal bewährt.

Die Potsdamer Aufnahmen der Granulation sind insbesondere zur Erforschung ihrer zeitlichen

ung gemacht worden. Im Zusammenhang damit auf die eigenartige Methode von TEN BRUGTE und GROTRIAN [6] bei der Bestimmung der Lebensdauer der Granulen eine durch Verdampfen des sublimierten Kampfers hervorgerufene „künstliche Granulation“ heranzuziehen hingewiesen.

Die Gleichmäßigkeit der Bewegung des Verfalls müssen, zur Gewinnung photometrierbarer Aufnahmen und damit die Belichtungszeit reproduzierbar ist, äußerst hohe Anforderungen gestellt werden. Unter den käuflichen Verschlüssen haben sich Schlitzverschlüsse der Kleinkameras Contax, Leica und Leica am besten bewährt. Für Granulaaufnahmen sind sie viel zu klein. Da sich der Verfall benutzte Verschuß als nicht hinreichend gleichmäßig ablaufend erwiesen hat, haben neuerdings VON KLÜBER und MÜLLER (1948 [30]) unter Umkehr zu einer seinerzeit von LOHSE (1889) und KLEIN (1896) benutzten Art des Schlitzverschlusses das Potsdamer Turmteleskop einen neuen Verschuß konstruiert, der den Anforderungen entspricht. Die Bewegung des mit kugelgelagerten staubgeschützten Rollen versehenen Verschlusses erfolgt längs sorgfältig ausnivelierten polierten Rundstahlgleiten. Der Impuls von konstanter Stärke wird durch eine gespannte Feder erteilt. Die Prüfung der Verfallgeschwindigkeit und Bestimmung der Belichtungszeit erfolgt durch Erzeugung äquidistanter Streifen auf der Platte mit Hilfe eines Spiegels bekannter Rotationsgeschwindigkeit bei engem Schlitz. Zur Dosierung der Belichtung dient ein elektronischer lichtelektrischer Belichtungsmesser.

Bei Ermittlung des durch die Flecken, Fackeln und die Granulation bestimmten Helligkeitsverlaufs über eine Strecke auf der Sonnenscheibe mit Hilfe eines Registrierphotometers bei bekannter Schwärzkurve ist das Auflösungsvermögen außer der Auflösungsbreite durch die Plattenkörnigkeit bestimmt. Eine entsprechende direkte *lichtelektrische* Registrierung wäre von letzterem Nachteil frei, doch muß wegen ihrer Langsamkeit die Szintillation wegen des zufälligen Nacheinanderfolgens der Registrierpunkte nicht in anderer Weise und in viel stärkerem Maße bemerkbar machen. SIEDENTOPF (1939 [61]) hat eine Kombination einer Abtastvorrichtung mit Photozelle und Verstärker angegeben, die unter Zuhilfenahme eines Kippgeräts die Intensitätsverteilungskurve als kontinuierliches Bild auf dem Schirm eines BRAUNschen Oszilloskops wiedergibt. Die photographische Aufnahme des Schirmbildes von 5 sec Belichtungszeit stellt den Mittelwert über 1000 einzelne Registrierkurven dar, durch den zeitlicher Ausgleich der Szintillation erreicht wird. Auf Kosten der Schärfe der Kurve herbeigeführt wird. Die durchgeführte Überschlagsrechnung zeigt, daß bei der bei einer Eintrittsfläche von 1 cm^2 nach Abzug aller Verluste in die Photozelle gelangende Energiemenge bei Verzicht auf Einengung der Spektralbereiche das 5fache der Mindestenergie beträgt. Die Hinzufügung eines Elektronenvervielfachers ist geeignet, den Übergang zu einem nicht zu schmalen Spektralbereich zu gestatten.

2. Monochromatfilter.

Bei der Beobachtung der Photosphäre vor der abgetragenen Chromosphäre, in welcher die FRAUNHOFERschen Absorptionslinien entstehen, der Sonnen-

korona im Lichte ihrer hellen Linien, der Protuberanzen und vieler anderer Erscheinungen wird ein Lichtfilter mit sehr engem Durchlässigkeitsbereich von der Breite einer Spektrallinie und noch schmaler benötigt, das als Monochromatfilter bezeichnet werden kann. Dafür kommt keines der bekannten Glas- oder Gelatinefarbfilter in Frage, weil der Durchlässigkeitsbereich auch bei Kombinationen viel zu groß ist. Das sehr lichtstarke CHRISTIANSEN-Filter aus sehr feinem in eine Flüssigkeit von gleichem Brechungsindex eingebettetem Glasstaub mit verhältnismäßig schmalen Durchlässigkeitsbereich (etwa 80 Å), ist für die Sonnenbeobachtung sehr schlecht geeignet, weil es die außerhalb der Durchlässigkeit liegenden Wellenlängen nicht absorbiert sondern streut.

Ein lichtstarkes für die Sonnenbeobachtung entwickeltes Filter engen Durchlässigkeitsbereichs stellt das *Polarisationsfilter* dar, das auch „Interferenzfilter“ genannt wird. Sein Prinzip ist von LYOT (1933 [36]) angegeben worden, der schon 1927 mit seiner Konstruktion begonnen hat, diese aber in Ermangelung hinreichend großer Polarisatoren zunächst einstellen mußte. Darauf hat ÖHMANN (1938 [49], [50], [51]) ohne Kenntnis der Arbeiten von LYOT ein auf dem gleichen Prinzip beruhendes Filter von 40 Å Durchlässigkeitsbreite unter Verwendung von Polarisationsfolien gebaut. 1938 hat dann LYOT seine Arbeiten wieder aufgenommen und zuletzt $0,6 \text{ Å}$ erreicht. Die Theorie und die Konstruktion des Filters, sowie seine Anwendung in der Sonnenphysik, auch die Geschichte seiner Entstehung hat LYOT (1944 [37]) ausführlich dargestellt.

a) *Grundsätzliches.* Ein Polarisationsfilter besteht aus einer Anzahl parallel zur optischen Achse geschnittener einachsiger Kristallplatten, von denen jede sich zwischen 2 Polarisatoren befindet, so daß die Zahl der Polarisatoren um 1 größer ist. Die Dicke einer Kristallplatte beträgt jeweils das Doppelte der vorhergehenden. Die Polarisations Ebenen der Polarisatoren sind einander parallel und bilden mit der optischen Achse der Platten einen Winkel von 45° .

Nach Durchsetzen des ersten Filterelementes durch ein paralleles Lichtbündel besteht zwischen den in der Polarisations Ebene des Austrittspolarisators schwingenden Komponente des ordentlichen und der gleichsinnig polarisierten des außerordentlichen Strahls ein von der Plattendicke und der Wellenlänge abhängiger Gangunterschied. Nach dem Durchgang durch ein Filter aus n Elementen entstehen auf diese Weise 2^n gegeneinander um den gleichen Phasenbetrag verschobene parallele Lichtschwingungen, jede von 2^n mal kleinerer Amplitude, so daß die Intensitätsverteilung in der Wellenlängenskala derjenigen eines 2^n -strichigen Gitters entspricht.

Die nach dem Lichtdurchgang durch eine wie ein Filterelement geschnittene Kristallplatte zwischen 2 Polarisatoren im kontinuierlichen Spektrum in gleichen Abständen erscheinenden dunklen Gebiete sind als MÜLLERSche Streifen schon lange (JOH. MÜLLER 1847) bekannt (s. [47]). Es ist klar, daß durch Überlagerung der dunklen Gebiete der einzelnen Filterelemente alles Licht bis auf schmale äquidistante helle Linien im Spektrum unterdrückt wird, deren gegenseitiger Abstand der dünnsten, deren Breite der dicksten Kristallplatte entspricht. Durch

geeignete Dimensionierung der Plattendicke und Zuhilfenahme gewöhnlicher Farbfilter kann erreicht werden, daß nur eine mit einer vorgegebenen Wellenlänge übereinstimmende „Durchlässigkeitslinie“ übrig bleibt.

Die genaue Anpassung des Filters an eine bestimmte Wellenlänge wird durch seine *Temperaturempfindlichkeit* ermöglicht, die einerseits Folge der Dickenänderung der Kristallplatten, andererseits Folge der Änderung der Differenz der Hauptbrechungsexponenten ist, wobei letztere Ursache überwiegt. Bei Quarz verschiebt sich bei Temperaturzunahme um 1° das Durchlässigkeitsmaximum um $1/10000$ der Wellenlänge nach Blau, was bei engem Durchlässigkeitsbereich den Einbau in einen Thermostaten nötig macht, der gleichzeitig zur Wellenlängenregulierung dient.

In *konvergentem* bzw. *divergentem* Licht sind die Kurven gleichen Gangunterschieds Hyperbeln. Die Tangente des halben Winkels zwischen den Asymptoten ist gleich dem Verhältnis der Hauptbrechungsexponenten. Für einen Unterschied des Durchlässigkeitsmaximums von $1/10000$ Wellenlänge zwischen dem am stärksten geneigten und dem Mittelstrahl läßt sich zwischen die das Gesichtsfeld begrenzenden Hyperbeln ein Rechteck mit Seitenlängen von bei Quarz etwa $2^\circ,6$ bei Kalkspat etwa $2^\circ,9$ einbeschreiben. Eine Öffnung dieser Größe reicht für die Beobachtung der Sonne einschließlich der Korona gerade aus.

Zur für verschiedene Zwecke wichtigen Vergrößerung des Gesichtsfeldes hat LYOT [37] folgende 3 Wege angegeben, durch die dies erstaunlich groß gemacht werden kann:

1. Ergänzung der Kristallplatte durch 2 Platten gleicher Dicke mit zueinander senkrechten Hauptachsen unter Dazwischenfügung einer $\frac{1}{2}\lambda$ -Platte mit um 45° verdrehten Hauptrichtungen. Die Isochromaten werden nunmehr Kreise. Der Gesichtswinkel wird bei Quarz 26mal (34°), bei Kalkspat 6mal größer (17°).

2. Kombination einer positiv und einer negativ einachsigen Kristallschicht (Quarz und Kalkspat) in berechnetem Dickenverhältnis. Das Gesichtsfeld ist kreisrund und 9mal größer (25°) als bei einfacher Quarzplatte.

3. Zusätzliche beiderseitige Anbringung je einer Platte gleichen der Hauptplatte entgegengesetzten Vorzeichens (2 Kalkspatplatten zu Quarz), die Achse der einen parallel, die der anderen senkrecht zur Hauptplattenachse. Die Isochromaten sind von Kreisen wenig verschiedene Ellipsen. Eine 4fache Vergrößerung (10°) des Gesichtsfeldes wird erreicht.

Die letzte Anordnung hat vor den beiden anderen den Vorzug, daß die Gesichtsfelderweiterung durch sie in einem weiten Spektralbereich erzielbar ist.

b) *Ausführungen*. LYOTS erstes Filter, dessen Bau 1934 in Ermangelung von Kalkspat für die Polarisatoren eingestellt werden mußte, sollte ein Universalfilter für alle Wellenlängen mit durch kreisförmige Platten verstellbarer Dicke der Kristallelemente mit nach der 3. Methode erweitertem Gesichtsfeld für eine Durchlässigkeitsbreite von 1 \AA sein. Das zweite 1939 mit inzwischen erschienenen Polarisationsfolien als Polarisatoren fertiggestellte Filter ist für einen breiteren Durchlässigkeitsbereich von 2 \AA im Grün und 3 \AA im Rot gebaut ohne Erweiterung des Gesichtsfeldes mit Quarzplatten konstanter Dicke. Infolge eines günstigen Zusammentreffens zwischen den Abständen der wichtigsten Sonnenlinien voneinander und der Wellenlängenabhängigkeit der Hauptbrechungsexponenten von Quarz gelang es, durch entsprechende Dickenwahl eine so gute Anpassung an diese Linien (die Wasserstofflinien H_α und H_β ; die starken Koronallinien: die grüne und die rote; die

Heliumlinie H_3 ; die starke Magnesiumlinie b_1) zu erzielen, daß eine genaue Einstellung durch Temperaturänderung mit Hilfe eines Thermostaten im Intervall von $14^\circ,9$ bis $47^\circ,5$ möglich ist. Das Filter besteht aus 6 Quarzplatten von $36 \times 36 \text{ mm}$ Querschnitt und 7 Polarisationsfolien und stellt ein Parallelpipiped von 150 mm Länge dar.

Mit dem zweiten Filter wurden große Fortschritte in der Beobachtung der Korona erreicht. Der Lyotsche Protuberanzenfilm ist mit seiner Hilfe aufgenommen worden. Trotzdem haben sich die Polarisationsfolien in vieler Hinsicht nachteilig erwiesen.

Nachteile: 1. Nach Blau zunehmende Absorption. 2. unvollständige Polarisation im Rot. 3. Starke Lichtstreuung (TYNDALL-Effekt). 4. Ungleichmäßige Dicke, daher Schlieren.

Darum wurden 1941, als ein genügend großer wandfreier Kalkspatkristall nunmehr zur Verfügung stand, aus diesem Kristall und Kronglas angefertigte doppelbrechende Prismen als Polarisatoren an Stelle der Polarisationsfolien eingefügt. Der außerordentlich starke Strahl geht durch alle Prismen nahezu geradlinig hindurch. Durch die durch jedes Prisma $3^\circ,1$ abgelenkten ordentlichen Strahlen entstehen außerhalb des Gesichtsfeldes liegende Nebenbilder, die ausgeblendet werden. Es ist nun möglich, Bilder größter Vollkommenheit durch das Filter hindurch zu entwerfen. Die Durchlässigkeit hat sich auf 4 \AA erhöht. Die Streustrahlung ist bei weitem schwächer als mit Polaroidfolien.

Das verbesserte zweite Filter wurde von LYOT vielseitig verwendet. Zur Beobachtung der Chromosphäre wurde es 1942 durch ein weiteres Element mit Kalkspatplatte (Dicke $8,3 \text{ mm}$) ergänzt, wodurch die Durchlässigkeit von 3 \AA auf $1,5 \text{ \AA}$ verschärft worden ist.

Auf der letzten Tagung der International Astronomical Union (Zürich 10. – 20. August 1948) führte LYOT sein *neuestes* Filter vor, das eine Durchlässigkeitsbreite für H_α von $0,6 \text{ \AA}$ aufweist, ein erweitertes Gesichtsfeld besitzt und, am Astrographen der Reichen Sternwarte montiert, die ganze Sonnenscheibe bis $5'$ über deren Rand hinaus auf einmal zu beobachten gestattet.

Seit 1939 stellten die Zeiß-Werke in Jena Polarisationsfilter für H_α von 30 \AA Durchlässigkeitsbreite (HAASE 1941 [14]) und weniger mit Polarisationsfolien nach BERNAUER (vgl. HAASE 1935 [15]) her. Das von HAASE [14] beschriebene Filter besteht aus vier runden (Durchmesser 30 mm) Quarzplatten, um keine übermäßig große Dicke zu erreichen, eine dünnen Kalkspatplatte, die zusammen mit einer SCHOTTschen Rotfilter RG 2 ein Ganzes bilden. Die Durchlässigkeit beträgt 25% . Außerdem hat ZEISS Polarisationsfilter für verschieden engen Durchlässigkeitsbereich (bis zu $0,6 \text{ \AA}$ für H_α) mit Polarisationsfolien für das FRAUNHOFER-Institut gebaut.

Polarisationsfilter zur Beobachtung von Protuberanzen in H_α sind in den Vereinigten Staaten von EVANS (1940 [9]) mit 5 \AA und von PETTIT (1941 [53]) mit $5\frac{1}{2} \text{ \AA}$ Durchlässigkeitsbreite konstruiert worden.

Außer dem Polarisationsfilter besteht, worauf LYOT [37] hingewiesen hat, die Möglichkeit, mit Hilfe der FABRY-PÉROT-Interferenzen halbverspiegelte Platten enge Wellenbereiche zu isolieren. Bisher sind nur tastende Versuche unternommen worden (WIL-

4 [71]), diese Eigenschaft des FABRY-PÉROT-Interferometers zur monochromatischen Sonnenbeobachtung nutzbar zu machen. Sehr handliche Geräte für breiteren Durchlässigkeitsbereich (etwa 10 Å für H_{α}) durch beiderseitige halbdurchlässige Spiegelung planparalleler Glasplatten durch Aufbringen einer Metallschicht hat GEFFCKEN bei der Firma Schott-Jena hergestellt. Sie haben gegenüber Polarisationsfiltern den Vorteil der Verwendbarkeit im Infrarot.

3. Spektroheliograph und Spektrohelioskop.

Zur Beobachtung der Chromosphäre innerhalb der Absorptionslinien (H_{α} des Wasserstoffs, K des Kalziumions), eines der wichtigsten Gebiete der Sonnenüberwachung, macht eine so starke Monochromatisierung ($0,2\text{--}0,4\text{ Å}$) erforderlich, wie sie nur mit Hilfe von Spektralapparaten gelingt. Dabei ist wegen der Kontinuität des Hintergrundes die Erzeugung eines monochromatischen Bildes der Sonnenoberfläche oder ihrer Teile durch bloße spektrale Selektion nicht zu erreichen, wie das bei Protuberanzen möglich ist. Die im Wiederaufheben der Zerlegung bestehende auf STREBEL (1931 [66]) zurückgehende Methode sei nur kurz erwähnt, da sie für so enge Wellenlängenbereiche kaum in Frage kommt. Die Lösung dieser Aufgabe ist HALEs Spektroheliographen (1889) und dem HALEschen Spektrohelioskop (erst 1929) zu verdanken. Letzteres stellt nicht nur eine wertvolle Ergänzung des Spektroheliographen, sondern auch einen wesentlichen Fortschritt dar, da es gestattet, durch schnelle genau meßbare Veränderung des Wellenlängenbereichs mit Hilfe des Linienschalters, einer $1\text{--}2\text{ mm}$ dicken planparallelen drehbaren Glasplatte, den Zustand verschiedener tiefer Schichten der Chromosphäre zu studieren, die Bewegung der Protuberanzen räumlich zu erfassen und den Verlauf kurz dauernder Eruptionen zu verfolgen. Seine Bedeutung für die Sonnenüberwachung ist daher sehr groß. Vor dem Kriege waren in verschiedenen Ländern mehr als 20 Spektrohelioskope im Betrieb.

Bei beiden Apparaten entsteht das monochromatische Sonnenbild durch Bewegung des primären Sonnenbildes in der Ebene des Eintrittsspalt und die zu ihr gleichsinnige Bewegung des Austrittsspaltbildes. Beim Spektrohelioskop ist die Bildfolge so schnell, daß die spaltförmigen Bildelemente für das Auge zu einem Bild verschmelzen. Beim Spektroheliographen wird während einer Aufnahme meist nur eine Bewegung in einer Richtung ausgeführt.

Die Leistungsfähigkeit von Spektroheliographen ist abhängig von den Eigenschaften des Monochromators, der Abbildung durch die unbegriffenen optischen Systeme und der Luftunruhe hat v. KEUSSLER (1948 [24]) in Anschluß an die Theorie der Linienskanten ausführlich diskutiert. Demnach genügt es für einen aus dem Gebiet der Linienflügel ausgesonderten Wellenlängenbereich, die Dispersion so groß zu wählen, daß die Breite der Absorptionslinie derjenigen der Apparatfunktion der ganzen Anordnung gleichkommt. Für die Linienmitte dagegen muß die Linienbreite ein vielfaches der Apparatfunktion betragen. Infolge der zwischen der günstigsten Spaltbreite und den übrigen Apparatkonstanten bestehenden Beziehungen hängt bei gegebener Lei-

stungsfähigkeit die Lichtstärke, abgesehen von Lichtverlusten, nur vom Öffnungswinkel ab, unter dem das monochromatische Bild erscheint.

Wegen der hohen Anforderungen an das spektroskopische Auflösungsvermögen werden im langwelligen Gebiet Gitter, im kurzwelligen Prismensätze benutzt. Der Linienkrümmung muß durch gekrümmte Spalte Rechnung getragen werden. Zur Vermeidung einer Bildverzerrung ist die Krümmung auf Ein- und Austrittsspalt gleichmäßig zu verteilen. Die Spaltkrümmung wurde früher empirisch bestimmt. Doch ist das mühsam und nicht immer hinreichend genau. Ihre rechnerische Ermittlung aus den Apparatkonstanten ist daher vorzuziehen. Krümmungsformeln für Prismen sind schon lange bekannt (DITSCHNEIDER 1865, Näherungsformel; ADAMS 1900 [1], exakte Formel für die Minimumstellung). Die erste Näherung für das Gitter (Parabel) haben WALKER (1909 [70]), RANDALL und FIRESTONE (1938 [55]) und MINKOWSKI (1942 [45]) angegeben. Genaue, sowie Formeln verschiedenen Annäherungsgrades hat unter Berücksichtigung der Bedürfnisse der Spektroheliographie v. KEUSSLER (1948 [25]) für Gitter und für Prismen abgeleitet. Beim Übergang zu einer anderen Spektrallinie besteht auf Grund einer für Gitter und für Prismen gültigen Beziehung die Möglichkeit, die Linienform der vorhandenen konstanten Spaltkrümmung anzugleichen (v. KEUSSLER 1948 [26]).

Spektroheliographen werden selten wie der große RUMFORD-Spektroheliograph des YERKES-Observatoriums (HALE und ELLERMAN 1903 [16]) an Fernrohren montiert, sondern meist in Verbindung mit Zölostaten benutzt. Eine leichte beinahe reibungslose Bewegung wird gewöhnlich durch Lagerung auf Kugellagerkugeln zwischen Stahlschienen erzielt. Bei kleinen Apparaten wird bei feststehenden Objektiv und Platte der Monochromator allein bewegt, bei großen die Bewegung schwerer Teile nach Möglichkeit vermieden. Bei dem Spektroheliographen des Observatoriums Meudon (Beschr.: D'AZAMBUJA 1930 [2]) werden Objektiv und Platte durch 2 Synchronmotoren mit kontinuierlich regulierbarer Übersetzung ohne gegenseitige Koppelung bewegt. Eine einfache Bewegung der Bilder durch Drehung zweier zueinander paralleler Spiegel mit Hilfe eines Gelenkparallelogramms hat HECKMANN (1944 [22]) vorgeschlagen.

An die Gleichmäßigkeit der Bewegung werden äußerst hohe Anforderungen gestellt, da selbst sehr geringe Geschwindigkeitsänderungen zu Streifenbildung Anlaß geben. Das Spektroheliographenmodell der Askania-Werke (Beschr.: SCHAUB 1937 [57]) ist mit einer *Ölbremse* ausgerüstet, bei deren verzögernder Wirkung eine sehr gleichmäßige Bewegung durch den Zug eines Gewichtes zustande kommt. Meist wird aber die Drehbewegung eines Motors unter Zwischenschaltung eines Getriebes durch eine *Spindel* in translatorische Bewegung umgewandelt. Nur Spindeln höchster Präzision können Verwendung finden. Den Einfluß geringer periodischer Spindelfehler hat v. KEUSSLER (1948 [27]) theoretisch und empirisch untersucht. Die Rechnung zeigt, daß die periodische relative Schwankung der Lichtintensität auf der Platte das 2π -fache des Verhältnisses der Amplitude des periodischen Fehlers zur Ganghöhe beträgt. Verhältnismäßig gute Spindeln mit Fehleramplituden von $0,002\text{ mm}$ haben sich als total

unbrauchbar, Meßspindeln höchster Qualität als gerade gut genug erwiesen.

Bei dem Spektrohelioskop hat sich unter den von HALE angewandten Methoden der Bildbewegung (HALE 1929 [17]; ausführliches Referat: GROTRIAN 1931 [12]) diejenige mit Hilfe schnell rotierender Prismen quadratischen Querschnittes, sog. ANDERSON-Prismen, durchgesetzt. Eine absolute Übereinstimmung der Rotationsgeschwindigkeit wird am einfachsten durch eine gemeinsame Rotationsachse erreicht. Im Spektrohelioskop von SIEDENTOPF (1941 [62]) wird ein einziges vom primären und vom monochromatisierten Strahl, senkrecht zueinander, durchgesetztes ANDERSON-Prisma benutzt. Bei gleichsinniger Prismenrotation und entgegengesetzter Bildverrückung wird die Beobachtung von Protuberanzen durch weitgeöffnete Spalte nur durch eine zusätzliche Vorrichtung zur Bildseitenumkehr (PETTIT 1940 [54]) ermöglicht. Letztere erübrigt sich, wenn die Prismen durch zwei getrennte Synchronmotoren in entgegengesetztem Sinne angetrieben werden, wobei die Phasenangleichung nach PETTIT [54] durch Drehung des Stators um die Motorachse während der Beobachtung bequem und sicher zu erreichen ist.

Die Benutzung von ANDERSON-Prismen ist mit einer Reihe grundsätzlicher in praxi aber kaum ins Gewicht fallender Nachteile verbunden. Frei von diesen Nachteilen ist das von BECKER und TEN BRUGGENCATE (1946 [4]) vorgeschlagene Konstruktionsprinzip, das auf Anwendung eines rotierenden *Spiegelpolygons* im parallelen Strahlengang beruht. Dabei ist zur Beschränkung der erforderlichen Zahl der Spiegel die Einschaltung von vier gleichartigen Systemen vom Typus des RAMSDEN-Okulars erforderlich.

Nur mit Hilfe des am großen Refraktor des YERKES-Observatoriums montierten RUMFORD-Spektroheliographen ist bei günstigen Luftverhältnissen eine bis an 1–2'' heranreichende Auflösung im monochromatischen Sonnenbild erreicht worden. Mit Spektroheliokopen vom HALEschen Typ werden bestenfalls 7'' erreicht. Das neueste LYOTSche Polarisationsfilter (Durchlässigkeitsbreite 0,6 Å für H α) soll etwa 3'' ermöglichen.

In neuerer Zeit sind zur Sonnenüberwachung einfach zu handhabende kombinierte Apparate mit der Möglichkeit schneller Aufeinanderfolge der Aufnahmen und eines sofortigen Überganges von spektroheliographischen Aufnahmen zu spektrohelioskopischer Beobachtung und umgekehrt erforderlich. Dadurch ist die Konstruktion der spektroheliographisch-spektrohelioskopischen Anordnung des FRAUNHOFER-Instituts auf dem Schauinsland bei Freiburg i. Br. (V. KEUSSLER 1948 [28]) bestimmt worden. Bei diesem Apparat sind Objektiv und die Kassette mit der Platte nebeneinander auf einer durch den unter ihr befindlichen Mechanismus senkrecht zum Strahlengang beweglichen kleinen Plattform befestigt in der der Objektivbrennweite von 5 m entsprechender Entfernung von den Monochromatorspalten. Ein- und Austrittsrichtung des feststehenden Monochromators sind einander entgegengesetzt parallel. Der Austrittsspalt wird durch zwei unabhängig voneinander verstellbare hochwertige Linsen von je 2 m Brennweite auf die Platte abgebildet, der ganze Strahlengang durch zwei in den Spaltebenen befindliche Feldlinsen gebündelt. Die vom Motor mittels

eines Zahnradgetriebes und einer Präzisionsspindel übertragene Geschwindigkeit ist in einer geometrischen Reihe mit dem Quotienten 1,6 sprunghaft abstufbar. Aufnahmen können in jeder der beiden Bewegungsrichtungen erfolgen, wobei der Motor nach Ende der Belichtung automatisch durch Vakuumschalter ausgeschaltet wird. Der Übergang zu spektrohelioskopischer Beobachtung ist sofort möglich durch Einführung zweier durch Synchronmotoren angetriebener ANDERSON-Prismen mit Lupe in den vor den Spalten freien Raum. Die Justierung wird durch eingebaute Mikroskope und Beleuchtungslampen erleichtert und ohne Sonnenlicht ausgeführt.

Eine spektroskopische Zusatzeinrichtung (v. KLEBER 1944 [31]), die auch photographische Aufnahmen gestattet, zu der großen Spektralanlage besitzt seit einigen Jahren das Potsdamer Turmteleskop (EINSTEIN-Turm).

Bei Beobachtung mit dem Spektrohelioskop ist es mitunter sehr wichtig, die Lage der Objekte *meßbar* festlegen zu können. Eine einfache Vorrichtung dieser Art (Idee und Ausführung von F. LINK) beschreibt GÜNTZEL-LINGNER (1948 [13]).

Die Feststellung der Verteilung der Radialgeschwindigkeiten in der Chromosphäre ermöglicht die als „spectro-enregistreur des vitesses“ (D'AZAMBUJA [2]) bekannte Modifikation des Spektroheliographen. Der Austrittsspalt ist weit geöffnet. Sonnenbild und Platte werden jeweils um seine Breite automatisch sprunghaft verschoben. Es erscheint die Absorptionslinie in einzelnen Teilen der Sonne entsprechend vielfach nebeneinander.

Kinematographische Aufnahmen mit Hilfe des „Spektroheliokinematograph“en (McMATH 1933 [42] 1939 [43]; 1940 [44]) werden am McMATH-HUBERT-Observatorium der Universität Michigan gemacht. Zur Untersuchung der Radialgeschwindigkeiten von Protuberanzen ist dieser Apparat durch eine nach dem Prinzip des „spectro-enregistreur des vitesses“ arbeitende Vorrichtung ergänzt. Bis 1940 war bereits eine halbe Million Protuberanzen automatisch registriert.

Prinzipielle Überlegungen über ein mit Hilfe lichtelektrisch-fernsehtechnischer Methoden zu realisierendes Gerät, durch das die visuelle Beobachtung auch im Lichte der dem Auge unsichtbaren wichtigen K-Linie ermöglicht werden soll, hat ROSENTHAL (1933 [56]) angestellt. Nach seiner Meinung reicht bei für die Bildgüte genügend engem Spalt und feinem Raster die Intensität zum Betrieb der elektronenoptischen Teile aus. SIEDENTOPF [61] weist jedoch darauf hin, daß die Durchführung des lichtelektrischen Spektroheliokops auf Intensitätsschwierigkeiten stoßen wird, die sich nur durch Anwendung des von ZWORYKIN (1936 [72]) bei seinem Ikonoskop eingeführtem Speicherprinzip überwinden lassen.

Die Möglichkeit einer lichtelektrischen Photometrie der Sonnenoberfläche im Lichte von durch Spektroheliographen ausgesonderter Spektralbereiche hat KIEPENHEUER [29] untersucht und kommt zu dem Ergebnis, daß man, um nicht zu übermäßig großen Meßzeiten zu gelangen, sich mit Bildelementen von 100 □'' begnügen müßte.

4. Koronograph.

Die Flächenhelligkeit der Korona in 2' Abstand vom Sonnenrande beträgt nur rund $1 \cdot 10^{-6}$ derjenigen

Sonnenscheibe, so daß sie unter gewöhnlichen Bedingungen durch die die Sonne umgebende Streu-
aureole mehr als um das 100fache überstrahlt
wird. Daher konnte die Korona trotz ihrer Leucht-
intensität von etwa der des Vollmondes bis vor nicht
langer Zeit nur bei totalen Sonnenfinsternissen be-
achtet werden, denn auch bei günstigen atmo-
sphärischen Bedingungen im Hochgebirge ist die Be-
obachtbarkeit außer der künstlichen Ausblendung der
Sonnenscheibe durch weitgehende Beseitigung in un-
terschiedlichem Sinne abgelenkten Lichtes (instrumen-
telle) vorbedingung. Erst der Koronograph von
LYOT (1930 [38]; 1932 [39]; 1939 [40]), ein Fernrohr,
welches dieses Licht beseitigt, bzw. auf ein Mindest-
maß herabgesetzt ist, hat auf Hochgebirgsstationen
die Korona der Beobachtung und Überwachung
von etwa $\frac{1}{10}$ der Sonnenbeobachtungstage) zugänglich
gemacht. Zur Zeit sind im ganzen 5 Koronographen
im Betrieb: der Koronograph von LYOT auf dem Pic
de Midi (2780 m) in den Pyrenäen, der Schweizerische
Koronograph von WALDMEIER in Arosa (2050 m), der
Koronograph des FRAUNHOFER-Instituts auf dem
Madelstein (1840 m), der frühere Koronograph
des FRAUNHOFER-Instituts auf dem Görlitzengipfel
(1000 m) bei der Kanzelhöhe und der Koronograph
der Beobachtungsstation der Havard-Sternwarte in
Flagstaff (3500 m), Colorado USA, ebenfalls LYOTScher
Art. Seit dem Sommer 1943 bis Kriegsende war
der Koronograph des FRAUNHOFER-Instituts auf der
Zugspitze (3000 m) in Tätigkeit.

Das im Fernrohr nach Ausblendung der Sonnen-
scheibe übrigbleibende falsche Licht setzt sich aus
verschiedenen Anteilen zusammen:

a) Durch die Objektivöffnung gebeugtes Licht. —
Die Intensitätsverteilung außerhalb des geometri-
schen Sonnenbildrandes hat EINARSON (1934 [8])
in der Zugrundelegung der von NAGAOKA (1920 [48])
berechneten Tabellen graphisch dargestellt. Demnach
trägt die Intensität des Beugungslichtes im Ab-
stand von $2'$ vom Sonnenrande etwa $\frac{1}{3000}$ der Son-
nenflächenhelligkeit, übertrifft also die Korona um
den Faktor 350.

b) Von der der Sonne abgewandten Objektivseite
zurückgeworfenes und von seiner der Sonne zuge-
wandten Seite wieder in das Fernrohr reflektiertes
Licht, wobei im Inneren des Fernrohres ein kleines
Sonnenbild entsteht.

c) Durch Unregelmäßigkeiten des Objektivs (Blasen
im Glas, Unvollkommenheit der Politur, anhaftende
Staubteilchen) verursachtes Streulicht.

d) An der Objektivfassung gestreutes Licht.

e) Von im Inneren des Fernrohres schwebenden
Staubteilchen gestreutes Licht.

Nur durch eine Spezialanfertigung aus ausgesuch-
tem blasenfreiem homogenem Glas, durch sorgfältige
Politur unter Vermeidung geringster Kratzer und
regelmäßige Staubfreihaltung der Oberflächen gelingt
es, die Lichtstreuung durch das Objektiv (c) auf das
erforderliche Mindestmaß herabzusetzen. Um die
Größe der Flächen nicht zu vergrößern, werden nur
Kleinlinser benutzt. Die Prüfung eines Koronographen-
objektivs erfolgt durch Beleuchtung in sehr hellem
divergentem Licht, in dem sich jede Unregelmäßig-
keit sofort bemerkbar macht. Zur Beseitigung schweb-
ender Staubteilchen (e) werden die inneren Apparat-

wände durch eine Schicht zähen Öles überstrichen.
Trotz dieser Maßnahmen muß das Objektiv durch
vorsichtiges Entstauben fortlaufend gepflegt werden.

Die übrigen Quellen falschen Lichtes werden durch
die Besonderheiten der Koronographenkonstruktion
beseitigt. Die plankonvexe Objektivilinse bildet die
Sonne auf einen Schirm ab, dessen Radius um 15
bis 20" größer ist als der Sonnenradius. Der Schirm
ist in der Mitte einer Feldlinse befestigt, durch die das
Objektiv seinerseits auf die Irisblende abgebildet wird,
hinter der sich die den Schirm und die unmittelbare
Umgebung der Sonne auf die photographische Platte
abbildende Kameralinse befindet. Die Farbenkurve
der letzteren ist so berechnet, daß die chromatische
Aberation des Objektivs aufgehoben wird. Der Aus-
blendeschirm an der Feldlinse ist spiegelnd und ge-
neigt, bei den neueren Konstruktionen kegelförmig.

Das durch die Objektivöffnung gebeugte Licht (a)
wird durch Abblendung der Ränder des Objektiv-
bildes mittels der Irisblende beseitigt.

Die Wirkungsweise der Anordnung ist nur vom Standpunkt
der strengen Beugungstheorie verständlich, die zu einer von
der Begrenzung der Öffnung ausgehenden „Beugungswelle“
führt, welche von der Irisblende aufgefangen wird.

Das durch die Objektivfassung gestreute Licht (d)
wird gleichfalls durch die Irisblende abgefangen. Die
schwache Intensität, die von dem durch Reflexion
an den Flächen des plankonvexen Objektivs in $\frac{1}{4}$
seiner Brennweite hinter ihm entstehenden kleinen
reellen Sonnenbild herrührt (b), wird durch eine kleine
runde Blende vor der Kameralinse abgehalten. Bei
Fortlassung der Blende, wie bei einigen Ausführungen,
kann nur in der Mitte der abgeschirmten Sonnen-
scheibe auf der Platte ein unscharfes kleines schwa-
ches Bild entstehen.

Der letzte Koronograph von LYOT besitzt ein
Objektiv aus Kronglas von 20 cm Durchmesser und
4 m Brennweite. Die Feldlinse wird, damit Staub-
teilchen auf ihrer Oberfläche nicht mitphotographiert
werden, durch einen besonderen Mechanismus in
Rotation versetzt. Zur Beobachtung des Spektrums
der Korona ist eine leistungsfähige Spektralanord-
nung mit Plangitter anmontiert mit der Möglichkeit,
gleichzeitig ein kontinuierliches Vergleichsspektrum
für photometrische Messungen zu entwerfen. Außer-
dem befindet sich am Apparat ein LYOTSches Polari-
meter (LYOT 1929 [41]) zur genauen Messung selbst
geringer Polarisationsgrade (Genauigkeit 0,1%).

Der Koronograph von WALDMEIER (1939 [69])
ist kleiner (Objektivdurchmesser 12 cm; Brennweite
120 cm) und unterscheidet sich von den LYOTSchen
Ausführungen im wesentlichen nur durch die Hilfs-
apparate. Durch zwei auswechselbare geradsichtige
Prismensätze ist eine bequeme Beobachtung des
Spektrums parallel zur Koronographenachse möglich.
Durch Drehung des ganzen Spektralapparats kann der
15 cm lange Spalt beliebig orientiert werden.

Die Koronographen des FRAUNHOFER-Instituts
(Objektivdurchmesser 11 cm; Brennweite 165 cm)
wurden von Zeiß-Jena hergestellt.

Bei Aufnahmen in allgemeinem Licht werden zur
Herabsetzung der Wirkung des Himmelsstreulichtes
Rotfilter und rotempfindliche Platten benutzt. Es
ist günstigenfalls die innere Korona bis zu einem
Abstande von $7'$ vom Sonnenrande beobachtbar.
Mit Hilfe der bereits besprochenen Polarisationsfilter

engen Durchlässigkeitsbereichs wird im Lichte der hellen Linie $\lambda 5302$, 82 \AA auch die äußere Korona leicht erfaßt. Isophoten der monochromatischen Emission dieser Linie werden auf allen Koronographenstationen systematisch aufgenommen. Dabei wird auf dem Pic du Midi, in Arosa und am FRAUNHOFER-Institut zur Photometrie und zur Reduktion auf Streulichtfreiheit ein visuelles, in Climax ein photographisches Verfahren angewendet. Auch ist es mit Hilfe des Koronographen möglich, schwache Protuberanzen und deren Spektren aufzunehmen.

Jeder weitere Fortschritt ist durch das Himmelsstreulicht beschränkt. Nur an wenigen Tagen während sehr kurzer Zeit verschwindet für Hochgebirgsstationen die die Sonne umgebende Aureole so vollkommen, daß das Streulicht schwächer wird als die Koronahelligkeit. Verhältnisse, bei denen das Streulicht 10mal stärker ist als die Korona haben noch als befriedigend zu gelten.

Eine Anordnung, die Aussicht bietet, die durch das Himmelslicht gesetzte Schranke zu überwinden, ist von SKELLETT (1934 [63], [64]; 1940 [65]) entwickelt und darauf von BABCOCK (1942 [3]) weiter ausgebildet worden. Bei diesem als „coronaviser“ bezeichneten auf Anwendung fernsehtechnischer Methoden beruhenden Apparat wird der Bereich der Korona spiralförmig abgetastet und auf dem Schirm eines BRAUNschen Rohres sichtbar gemacht. Der zugrunde liegende Gedanke von SKELLETT besteht in der Abtrennung des dem zeitlich konstanten Teil des Streulichtes entsprechenden Gleichstromes und in der Ausfilterung der durch die Luftunruhe verursachten Stromkomponente niederer Frequenz. Auf diese Weise werden die durch Überstreichen von Protuberanzen und Koronastrahlen bei der Abtastung entstehende Wechselströme ausgesondert. Aus den von BABCOCK angestellten Überlegungen geht hervor, daß der für die Wahrnehmbarkeit der Korona maßgebende Faktor der Koronaintensität direkt, der Wurzel aus der Helligkeit des Himmelslichtes an der entsprechenden Stelle der Korona umgekehrt proportional ist.

Unter sehr ungünstigen Bedingungen (niedriger Beobachtungsort, Zölostat, gewöhnliches Objektiv) glaubt SKELLETT außer Protuberanzen auch einen intensiven Koronastrahl nachgewiesen zu haben. Die Versuche sind von BABCOCK in 1830 m Höhe mit verbesserten Hilfsmitteln (Nachbildung des LYOTschen Koronographen, bessere Abtastung) fortgesetzt worden, konnten aber aus äußeren Gründen nicht weitergeführt werden, nachdem bereits einige noch unsichere Ergebnisse erzielt worden sind. — Mit Entwicklungsarbeiten zur Herstellung eines lichtelektrischen Koronographen ist am FRAUNHOFER-Institut begonnen worden.

5. Protuberanzenspektroskop.

Früher konnten Protuberanzen nur mit Hilfe spektraler Zerlegung bei weit geöffnetem Spalt beobachtet werden. Heute sind die Polarisationsfilter mit dem Protuberanzenspektroskop mit Erfolg in Wettbewerb getreten. Protuberanzen lassen sich mit Hilfe eines Koronographen mit streulichtfreiem Polarisationsfilter sehr gut beobachten.

Um bei der großen zur Beobachtung erforderlichen Spaltbreite der Überstrahlung der Protuberanz durch

das vom Sonnenrande herrührende kontinuierliche Streulicht entgegenzuwirken, muß die Dispersion beträchtlich sein. Ferner ist es wünschenswert, die Protuberanz in zur Fernrohrachse paralleler Richtung beobachten zu können. Daher werden streng geradsichtige aus einer großen Anzahl Einzelprismen bestehende Prismen (AMICI-Prismen) verwendet. Der Spalt wird mit dem ganzen Apparat längs der Peripherie der Sonne um die Fernrohrachse drehbar in jeder Richtung orientierbar angeordnet. Protuberanzenspektroskope eignen sich in Verbindung mit Koronographen vorzüglich zur spektroskopischen Koronaobservation. Der Spektralapparat von W. MEIER ist nichts anderes als ein Protuberanzenspektroskop.

Protuberanzenspektroskope in moderner Ausführung wurden von Zeiß-Jena serienmäßig hergestellt. Um die Länge kurz zu halten und gleichzeitig durch große Brennweite hohe Dispersion zu erzielen ist der Strahlengang nach Art der Feldstecher durch totalreflektierende Prismen mehrmals umgeknickt. Zusätzliche geradsichtige Prismen für die Koronalinie $\lambda 5303 \text{ \AA}$ hat Zeiß für das FRAUNHOFER-Institut angefertigt.

6. Messung der Magnetfelder auf der Sonne.

Die einzige Möglichkeit zur Messung der Magnetfelder auf der Sonne bietet der ZEEMAN-Effekt der FRAUNHOFER-Linien. Dabei hat man zwischen lokale Magnetfeldern hauptsächlich der Sonnenflecken und einem allgemeinen Magnetfelde zu unterscheiden, das man als von einem Dipol im Sonnenmittelpunkt herrührend sich vorstellen kann. Die Messung der Feldverteilung in den Sonnenflecken erfordert sehr genaue Definition der Punktlage und daher Sonnenbilder sehr hoher Qualität. Auch an die spektroskopische Leistungsfähigkeit werden, besonders bei der Messung des jedenfalls schwachen allgemeinen Feldes, außerordentlich hohe Anforderungen gestellt.

Nachdem der Nachweis des ZEEMAN-Effektes der FRAUNHOFER-Linien HALE (1908 [18]) gelungen war, wurden auf dem Mt. Wilson mit Hilfe des 50 m-Sonnensturmes Magnetfeldmessungen systematisch durchgeführt. Vor einigen Jahren ist auch am EINSTEIN-Turm in Potsdam mit solchen Messungen begonnen worden (v. KLÜBER 1947 [33]).

Bei dem 50 m-Turmteloskop des Mt. Wilson-Observatoriums (ausführliche Beschr.: HALE und NICHOLSON 1938 [19]) wird durch den senkrechten Strahlengang ein Sonnenbild von 43 cm Durchmesser in der Ebene des Laboratoriumstisches auf den Spalt entworfen. Das im unteren Teil eines vertikalen Schachts in Autokollimationsstellung befindliche große Plangitter erzeugt auf der neben dem Spalt befindlichen photographischen Platte eine so große Dispersion, daß 1 \AA eine Länge von 4,9 mm im Spektrum 3. Ordnung entspricht. Durch Drehung des Spaltes und der Platte in der Tischebene und Nachführung des Gitters durch einen Elektromotor wird der Spalt zum Sonnenfleck beliebig orientiert. Das Objektiv des Potsdamer Turmtelops (Beschr. FREUNDLICH 1927 [10]) entwirft ein Sonnenbild von 13 cm Durchmesser, wobei der senkrechte Strahlengang durch einen Spiegel vor dem senkrecht stehenden Spalt waagrecht gemacht wird. Die Dispersion des großen Plangitters, ebenfalls in Autokollimations-

ung, in 2. Ordnung ist rund halb so groß als auf Mt. Wilson. Die ganze Anordnung ist derjenigen Mt. Wilson als etwa gleichwertig zu betrachten, ist infolge der Umlenkung des Strahlenganges beliebige Orientierung des Spaltes zum Sonnenlicht ohne weiteres möglich.

Da es sich bei den Messungen der ZEEMAN-Aufspaltungen um Verschiebungen $\Delta\lambda$ von 0,2 Å abwärts zu den kleinsten überhaupt noch feststellbaren ($\Delta\lambda = 0,005$ Å entspricht größenordnungsmäßig 100 Gß), sind zur Erreichung größtmöglicher Genauigkeit in Triplett, aufspaltende Linien mit dem Aufspaltungsfaktor (g -Faktor; $\Delta\lambda \propto g\lambda^2$) wellige möglichst scharfe isolierte Linien in der Umgebung scharfer terrestrischer Absorptionslinien, als Bezugslinien, zu wählen. Die Zahl der in der Umgebung kommenden Linien ist nicht groß. Heute bietet die vollständige Beherrschung des ZEEMAN-Effektes durch die Quantentheorie die Möglichkeit, geeignete Linien durch Berechnung ihres g -Faktors auszuwählen. Während HALEs Messungen seinerzeit sich auf eine Reihe langwelliger Linien erstreckten, hat v. KLÜBER fast ausschließlich die in der Nähe der scharfen terrestrischen Absorptionslinie λ 6302, 771 Å liegende Eisenlinie λ 6302, 508 Å ($g = \frac{3}{2}$) benutzt.

Infolge der durch den DOPPLER-Effekt verursachten Linienbreite findet eine regelrechte Aufspaltung nur in den Magnetfeldern der Sonnenflecken statt, wobei sich das bekannte Zusammenschrumpfen der Linienstrukturen infolge gegenseitiger Überlagerung in eine geringere Aufspaltung vorgetäuscht wird. Bei einer scheinbaren Aufspaltung oder Verfälschung durch Komponentenüberlagerung kann der ZEEMAN-Effekt nach Unterdrückung einer der äußeren zirkular bzw. schwach elliptisch polarisierten Komponenten, was am einfachsten mit Hilfe eines Polarisators mit davorgeschalteter $\frac{1}{4}$ - λ -Platte geschieht, gemessen werden. Zur Ermittlung der Feldrichtung wird der Sinn der Zirkularpolarisation festgestellt.

Bei der Anordnung von HALE (HALE 1913 [20]; HALE, ELLERMAN, NICHOLSON und JOY 1919 [21]) durch den 130 mm lange Spalt durch ein aus 4 Teilen bestehendes Nicol (Breite 32,5 mm; Länge 32,5 mm; Dicke 8 mm) überdeckt. Vor ihm befindet sich eine runde $\frac{1}{2}$ - λ -Platte von 50 mm Durchmesser. Durch die Drehung der durch das Nicol hindurchgelassenen Schwingungsrichtung um den doppelten Winkel bewirkt. Die $\frac{1}{4}$ - λ -Platte ist aus einer Anzahl nebeneinandergelegter 2 mm breiter Glimmerstreifen zusammengesetzt mit abwechselnd um 90° versetzten Schwingungsrichtungen. Selbst sehr schwache ZEEMAN-Effekte werden als kleine Knicke in dem sonst geradlinigen Verlauf vom Auge sofort wahrgenommen. — Auch v. KLÜBER [33] hat $\frac{1}{4}$ - λ -Glimmerattensätze nach HALE (Stufenbreite 1 mm) benutzt, als Polarisatoren die handelsüblichen Polarisationslinien, die bei der vollen Spalthöhe von 50 mm die Unterscheidung der Schwingungsrichtungen durch die große Drehung um 90° gestatten. Am besten bewährt haben sich Reproduktionsbernotare von Zeiß (sehr wenig gefärbte Herapatit-Einkristalle), die bis etwa 500 Å hinauf das Licht nicht wesentlich stärker als Nicols schwächen und zwischen 4000 und 6500 Å 100%ig polarisieren.

Der Polarisationszustand kann durch die zusätzliche elliptische Polarisierung durch die Zölostaten Spiegel und durch den

Spektralapparat beeinflusst werden. Letzterer Einfluß wird bei der HALEschen Anordnung durch das feststehende Nicol automatisch ausgeschaltet; die polarisierende Wirkung des Potsdamer Plangitters ist gering, muß aber unter Umständen ausgeschaltet werden. Die Polarisation durch die Zölostaten Spiegel ist von SEARES (1913 [59]) theoretisch untersucht worden mit dem Ergebnis, daß sie bei der Messung des ZEEMAN-Effektes zu vernachlässigen ist.

Da bei dem HALEschen Verfahren die beiden nicht ausgelöschten äußeren ZEEMAN-Komponenten, deren Abstand gemessen wird, nicht zum gleichen Ort auf der Sonne gehören, hat v. KLÜBER (1948 [32]); [34]) das Verfahren verbessert, das nunmehr gestattet, die von zwei dem gleichen Ort entsprechende Komponenten begrenzte Größe $2\Delta\lambda$ durch differentielle Vermessung einer Aufnahme unverfälscht durch DOPPLER-Effekte zu ermitteln. Anstatt des Polarisators wird eine doppelbrechende Prismenkombination (ROCHON) im parallelen Strahlengang zwischen 2 Linsen, statt des $\frac{1}{4}$ - λ -Plattensatzes nur eine $\frac{1}{4}$ - λ -Platte eingeführt, wodurch dicht übereinander 2 Bilder des gleichen durch eine Blende ausgesonderten Gebietes entstehen, von denen jedes eine der beiden durch Zusammenwirken der Drehung durch die $\frac{1}{4}$ - λ -Platte und der Doppelbrechung getrennten Komponenten enthält. Die durch die polarisierende Wirkung des Spektralapparats unter Umständen gestörte Gleichheit der Helligkeit kann durch geringfügige Drehung der $\frac{1}{2}$ - λ -Platte vor dem Spalt wiederhergestellt werden.

Außerdem hat v. KLÜBER ein zweites sehr genaues Verfahren angegeben und benutzt, bei dem $4\Delta\lambda$ bei Verwendung zweier verschiedener besonders ausgesuchter FRAUNHOFER-Linien gemessen wird. Außer dem ROCHON-Prisma statt des Polarisators wird statt der $\frac{1}{4}$ - λ -Platte eine hinreichend dicke Quarzplatte eingeführt, deren Dicke zu den beiden Wellenlängen so abgestimmt ist, daß die Platte auf die eine Linie als $\frac{1}{4}$ - λ -Platte, auf die andere als $\frac{3}{4}$ - λ -Platte wirkt. Das eine Teilbild enthält die beiden äußeren, das andere die beiden inneren Komponenten der gemeinsamen Aufspaltung beider Linien im Longitudinalfeld. Bei gleichem g -Faktor beträgt die Differenz $4\Delta\lambda$. Für vorgegebene Wellenlängen läßt sich die Plattendicke leicht berechnen.

Zur Erfassung kleiner ZEEMAN-Effekte ($\Delta\lambda < 0,01$ Å) liegt es nahe, die Meßgenauigkeit durch Heranziehung interferometrischer Methoden zu erhöhen. Ihre Anwendung in Verbindung mit der Bildteilungsverfahren hat v. KLÜBER [34] diskutiert. Bei richtig eingestellter Spaltbreite eines mit einem FABRY-PÉROT kombinierten Spektralapparats erscheint ein kontinuierliches Spektrum von einem System dunkler parabelähnlicher Interferenzkurven durchzogen, deren Wellenlängenabstand voneinander gleich dem Dispersionsgebiet des FABRY-PÉROT ist. Absorptionslinien machen sich in diesem sog. kanälierten Spektrum als zur Dispersionsrichtung senkrechte Reihen übereinanderliegender Verdickungen (Knoten) im Verlauf dieser dunklen Kurven bemerkbar. Der Punkt des Sonnenbildes, in dem das Magnetfeld gemessen werden soll, wird an die Stelle eines Knotens gebracht und sodann aus 2 Aufnahmen, deren jede einer um 90° verschiedenen Stellung der $\frac{1}{4}$ - λ -Platte entspricht, $2\Delta\lambda$ aus der Knotenverschiebung in Richtung der Dispersion des FABRY-PÉROT bestimmt. Ebenso kann dem entsprechenden Verfahren mit einer dicken Quarzplatte und 2 Linien analog $4\Delta\lambda$

bestimmt werden. Wegen des selbst bei den besten FRAUNHOFER-Linien ungünstigen Linienprofils bringt es keinen Vorteil, mit dem Auflösungsvermögen über einige Hunderttausend hinauszugehen.

Auch bei Zuhilfenahme der FABRY-PÉROT-Interferenzen wird die Meßgenauigkeit nicht so weit erhöht, daß das allgemeine Magnetfeld einwandfrei nachgewiesen und gemessen werden könnte. Daher hat THIESSEN (1946 [67]; 1947 [68]) eine *visuelle Kompensationsmethode* ausgearbeitet, die in folgendem besteht:

Im Strahlengang befinden sich hintereinander eine feststehende $\frac{1}{2}\lambda$ -Platte, eine $\frac{1}{2}\lambda$ -Platte, die in langsame Rotation versetzt werden kann, ein feststehender Polarisator (Zeißches Bernotar) und ein in eine Kammer mit periodisch veränderbarem Luftdruck eingeschlossenes FABRY-PÉROT-Interferometer. Bei langsam rotierender $\frac{1}{2}\lambda$ -Platte pulsieren die Knoten um eine dem Felde Null entsprechende Mittellage, desgleichen bei feststehender $\frac{1}{2}\lambda$ -Platte und periodischer Luftdruckschwankung im Interferometer. Erfolgen beide Pulsationen durch einen gemeinsamen Antrieb in Gegenphase, so kann durch Einstellen der Amplitude der Luftdruckschwankung während der Beobachtung die Verschiebung durch das Magnetfeld kompensiert werden.

Die Anordnung wird mit Hilfe einer im bekannten Magnetfeld einer Spule befindlichen Lichtquelle (rote Kadmiumlinie $2\,6438,47\text{ \AA}$; Kryptonlinie $2\,5570\text{ \AA}$) geeicht. Proportionalität zwischen der Hubhöhe des die Luftdruckschwankung erzeugenden Kolbens und der Magnetfeldstärke wurde festgestellt. Felder von wenigen Gauß konnten noch gemessen werden.

Die Apparatur wurde an den großen Refraktor der Hamburger Sternwarte montiert. Aus Beobachtungen, die sich auf eine Reihe von Linien erstrecken, war mit großer Wahrscheinlichkeit auf die Existenz eines allgemeinen Magnetfeldes von der von HALE angegebenen Stärke (50 Gß an den Polen) zu schließen (THIESSEN [68]). Seit 1947 kann aber mit der inzwischen weitgehend verbesserten Apparatur (Ausschaltung persönlicher Fehler; Meßfehler kleiner als 5 Gß) das allgemeine Magnetfeld der Sonne nicht mehr nachgewiesen werden¹. Ob es sich hierbei um ein vorübergehendes periodisches Verschwinden des Magnetfeldes handelt, muß vorerst dahingestellt bleiben.

Es ist der Versuch gemacht worden, einen Einblick in die Grundlagen und die gegenwärtigen Methoden der Sonnenbeobachtung zu geben. Dabei wurde Älteres und Bekannteres oft nur kurz erwähnt, Neueres eingehender behandelt. Viele Methoden scheinen geeignet, auch im physikalischen Laboratorium für verschiedene Zwecke Eingang zu finden.

Zusammenfassung.

Nach Aufzählung der Ziele und Aufgaben der Sonnenbeobachtung werden die die Beobachtung erschwernenden durch die Eigenschaften der Atmosphäre bedingten und durch die Einwirkung der Sonnenstrahlung auf die Apparate verursachten störenden Einflüsse angeführt. Sodann werden die Grundlagen und die Wirkungsweise der einzelnen

Apparate und Methoden auseinandergesetzt und die technischen Ausführungen beschrieben, wobei besonders auf die in den letzten 20 Jahren erzielten Fortschritte Rücksicht genommen wird.

- Literatur.** [1] ADAMS, W. S.: *Astrophysic. J.* **11**, 30 (1900). — [2] D'AZAMBUJA, L.: *Ann. Observ. Paris* (Meudon) **8**, 1 (1930). — [3] BABCOCK, H. W.: *Astrophysic. J.* **242** (1942). — [4] BECKER, W. u. P. TEN BRUGGENCA: *Nachr. Akad. Wiss. Göttingen, math.-physik. Kl.* **1946**, 49. — [5] TEN BRUGGENCA, P.: *Z. Astrophysik* **16**, 374 (1938). — [6] TEN BRUGGENCA, P. u. W. GROTRIAN: *Z. Astrophysik* **12**, 323 (1936). — [7] TEN BRUGGENCA, P., W. GROTRIAN u. E. v. d. PAHLEN: *Z. Astrophysik* **16**, 51 (1938). — [8] EINARSON, T.: *Z. Astrophysik* **8**, 208 (1934). — [9] EVANS, J. Publ. Astr. Soc. Pacific **52**, 305 (1940). — [10] FREUNDLICH, E.: *Das Turmteleskop der Einsteinstiftung*. Berlin 1927. — [11] GALLISSOT, Ch. et E. BELLEMIN: *J. Phys. Radium* **29** (1927). — [12] GROTRIAN, W.: *Naturwiss.* **19**, 193 (1931). — [13] GÜNTZEL-LINGNER, U.: *Astr. Nachr.* **275**, 157 (1948). — [14] HAASE, M.: *Zeiß-Nachr.*, 4. F., **1941**, 1. — [15] HAASE, M.: *Zeiß-Nachr.*, 2. F. **1935**, 55. — [16] HALE, G. E. and F. ELLERMAN: *Publ. Yerkes. Obs.* **3**, 3 (1903). — [17] HALE, G. E.: *Astrophysic. J.* **70**, 265 (1929). — [18] HALE, G. E.: *Astrophysic. J.* **28**, 315 (1908). — [19] HALE, G. E. and S. E. NICHOLSON: *Carnegie Inst. Washington Publ. Nr 498*, Part 1. Pap. Mt. Wilson Obs. Vol V, Part 1, 1938. — [20] HALE, G. E.: *Astrophysic. J.* **38**, 27 (1913). — [21] HALE, G. E., F. ELLERMAN, S. B. NICHOLSON and A. H. JOY: *Astrophysic. J.* **49**, 153 (1919). — [22] HECKMANN, O.: *Z. Astrophysik* **23**, 19 (1944). — [23] HOPFIELD, J. H. and H. E. CLEARMAN: *Phys. Rev.* **73**, 877 (1948). — [24] KEUSSLER, V. v.: *Z. Astrophysik* **25**, 220 (1948). — [25] KEUSSLER, V. v.: *Z. Astrophysik* **24**, 230 (1948). — [26] KEUSSLER, V. v.: *Z. Astrophysik* **24**, 252 (1948). — [27] KEUSSLER, V. v.: *Z. Astrophysik* **24**, 223 (1948). — [28] KEUSSLER, V. v.: *Z. Astrophysik* **25**, 231 (1948). — [29] KIEPENHEUER, K. O.: *FIAT-Ber.* (in Druck). — [30] KLÜBER, H. v. u. H. MÜLLER: *Z. Astrophysik* **24**, 208 (1948). — [31] KLÜBER, H. v.: *Z. Astrophysik* **23**, 57 (1944). — [32] KLÜBER, H. v.: *Z. Astrophysik* **24**, 1 (1948). — [33] KLÜBER, H. v.: *Z. Astrophysik* **24**, 121 (1948). — [34] KLÜBER, H. v.: *Z. Astrophysik* **25**, 187 (1948). — [35] LYOT, B.: *Astrophysic. J.* **101**, 255 (1945). — [36] LYOT, B.: *C. R. Paris* **197**, 1593 (1933). — [37] LYOT, B.: *Ann. Astrophysic.* **7**, 31 (1944). — [38] LYOT, B.: *C. R. Paris* **191**, 834 (1930). — [39] LYOT, B.: *Z. Astrophysik* **5**, 73 (1932). — [40] LYOT, B.: *Monthly Notices Roy. astronom. Soc.* **99**, 580 (1939). — [41] LYOT, B.: *Ann. Observ. Paris* (Meudon) **8**, 1 (1929). — [42] McMATH, R. R. and R. M. PATRICK: *Publ. Univ. Michigan* **5**, 103 (1933). — [43] McMATH, R. R.: *Monthly Notices Roy. astronom. Soc.* **99**, 559 (1939). — [44] McMATH, R. R.: *Publ. Univ. Michigan*, **8**, 57 (1940). — [45] MINKOWSKI, R.: *Astrophysic. J.* **96**, 306 (1942). — [46] MINNAERT, M. u. I. HOUTGAST: *Z. Astrophysik* **10**, 86 (1935). — [47] MÜLLER-POUILLETS *Lehrbuch der Physik* Bd. 2, 3. Buch, S. 962. 1909. — [48] NAGAOKA, H.: *Astrophysic. J.* **51**, 73 (1920). — [49] ÖHMAN, Y.: *Sterne* **18**, 266 (1938). — [50] ÖHMAN, Y.: *Nature, Lond.* **141**, 157 (1938). — [51] ÖHMAN, Y.: *Populär Astronomisk Tidskrift* (Stockh.) **1938**, 11. — [52] PAWSEY, I. L., R. PAYNE-SCOTTS and L. L. MCCREADY: *Nature, Lond.* **157**, 158 (1946). — [53] PETTIT, E.: *Publ. Astr. Soc. Pacific* **53**, 171 (1941). — [54] PETTIT, E.: *Publ. Astr. Soc. Pacific* **52**, 292 (1940). — [55] RANDALL, H. M. and F. A. FIRESTONE: *Rev. Sci. Instr.* **9**, 407 (1938). — [56] ROSENTHAL, A. H.: *Naturwiss.* **21**, 579 (1933). — [57] SCHAUB, W.: *Handbuch der Experimentalphysik*, Bd. XXIV, S. 252 (1937). — [58] SCHOTT, E.: *Physik. Bl.* **3**, 159 (1947). — [59] SEARES, F. H.: *Astrophysic. J.* **38**, 99 (1913). — [60] SIEDENTOPF, H. u. F. WISSHAK: *Optik* **3**, 430 (1948). — [61] SIEDENTOPF, H.: *Astr. Nachr.* **269**, 269 (1939). — [62] SIEDENTOPF, H.: *Z. Astrophysik* **19**, 154 (1939). — [63] SKELLETT, A. M.: *Phys. Rev.* **45**, 649 (1934). — [64] SKELLETT, A. M.: *Proc. nat. Acad. Sci., Wash.* **20**, 461 (1939). — [65] SKELLETT, A. M.: *Bell Syst. techn. J.* **19**, 249 (1940). — [66] STREBEL, H.: *Z. Astrophysik* **2**, 383 (1931). — [67] THIESSEN, G.: *Ann. Astrophysic.* **9**, 101 (1946). — [68] THIESSEN, G.: *Himmelswelt* **55**, 22 (1947). — [69] WALDMEIER, M.: *Z. Astrophysik* **19**, 21 (1939). — [70] WALKER, G. T.: *Kodaikanal Obs. Bull.* **16**, 71 (1909). — [71] WILLE, H.: *Interner Bericht des Fraunhofer-Inst.* 1944. — [72] ZWORYKIN, V. K.: *Z. techn. Phys.* **17**, 170 (1936).

¹ Nach einer freundlichen Mitteilung von Herrn THIESSEN.

Buchbesprechungen.

**Max Langer: Ein einheitliches Motorwähler-Fernsprech-
tem für Orts- und Fernverkehr.** Berlin, Göttingen, Heidel-
g: Springer 1948. IV, 124 S. u. 48 Abb. 8°. Preis brosch.
19,50.

Der in der Fachliteratur durch zahlreiche grundlegende
öffentlichungen wohl bekannte Verf. bringt mit diesem
Buch nicht nur die Beschreibung einer neuen Wählerkon-
struktion und des Wahlvermittlungssystems, in dem ihr Ein-
satz geplant ist, sondern behandelt im Zusammenhang damit
auch die neuesten und sehr umstrittenen Probleme der Wäh-
lertechnik für Orts- und Fernverkehr. Die Motor-
wählerkonstruktion, die schon seit mehr als zehn Jahren
erfolgreich erprobt ist, bedeutet in der heutigen schwierigen
Entwicklung der deutschen Fernmeldetechnik eine grundlegende
Entwicklung, welche vielleicht berufen ist, die jahr-
hundertlang umkämpfte Frage, hier Schrittwellensystem mit
elektrischer Einstellung, hier Motorwählersystem mit Speiche-
rung und Umrechnung in der Weise zu beantworten, daß die
Vorteile beider Systeme in einem Wähler erreichbar erscheinen.
Mit würde die bisherige deutsche Entwicklung, welche die
elektrische Schrittwelleneinstellung der Wähler im Orts- und
Fernverkehr beibehalten hatte und auch wohl für die Zukunft
beibehalten gedenkt, eine neue Rechtfertigung erhalten. —
Das Herz des neuen Motorwählers, der Antriebsmotor, be-
steht aus zwei an Stelle der Schalmagnete rechtwinklig zu-
einander angeordnete Magnetspuln als Stator und einen dreh-
baren Rotor, dessen Welle im Achsenschnittpunkt der
Magnete liegt. Der Rotor besteht aus z-förmig gestanzten
Stahlblechen mit zwei Haupt- und zwei Nebenpolen, die
abwechselungsweise von dem unter Strom gesetzten Elektro-
magneten angezogen werden. Die Drehung wird durch vier
feinabgestimmte Vorgänge veranlaßt, in dem Magnet 1
zunächst den vor ihm liegenden Hilfspol und dann unter
Verringerung des magnetischen Schließungswiderstandes den
Hauptpol vor die Mitte seines Polschuhes zieht. In diesem
Augenblick wird durch Umschaltung in der Erregung der
zweiten Magnete von dem Elektromagneten 2 der andere Hilfs-
pol erfaßt und entsprechend erst dieser und dann der Haupt-
pol angezogen. Dann wird wieder der erste Magnet ein-
geschaltet und das Spiel setzt sich in dieser Weise periodisch
fort. Aufgabe der elektrischen Schaltkreise ist es, die einzelnen
Magnete jeweils abwechselnd unter Strom zu setzen und dazu
ein Selbstunterbrecherkontakt auf der Motorwelle ange-
ordnet. Das Stillsetzen erfolgt durch Unterstromsetzen
der Magnete und wirkt in weicher Form, wobei geringe
Veränderungen schließlich dazu führen, den Hauptpol zentrisch
vor die Polmitte zu drehen. Die Drehungsgeschwindigkeit
des Rotors mit etwa 35—40 Umdrehungen in der Sekunde
wird durch Zahnradübersetzung derart auf die Wählerarme
übertragen, daß diese 250—300 Kontakte in der Sekunde
abstreichen. Zur Auswahl der hintereinanderliegenden De-
den ist ein Hilfsarm vorgesehen, welcher den Lauf innerhalb
der Impulsteilung von Stromschritt und Pause durch Zwei-
chenrast so hemmt, daß während des Impulses 6—7 und
während der Pause die restlichen Kontakte überstrichen
werden. Es ist gelungen, die Steuerstromkreise so auszu-
bilden, daß trotz dieser Unterteilung der Bewegungsvorgänge
auf Stromstoß und Pause größere Impulsenstellungen von
dem Wähler einwandfrei verarbeitet werden können, als bei
elektromechanischen Konstruktionen. Der Verf. erwartet sich von
der neuen Motorwählerkonstruktion alle Vorteile der ein-
fachen Schrittwellenschaltwähler, wie die Möglichkeit des direkten
Einzelantriebes mit unmittelbarer Steuerung durch die
Stromstöße, beweglichste Erweiterungsmöglichkeit, erschütte-
rungsfreies Arbeiten, große Anpassungsfähigkeit, große Sicher-
heiten, große Geschwindigkeit bei geringsten Abnutzungen.
Durch das Fehlen harter Anschläge wird ein erschütterungs-
reiches Arbeiten des Wählers und die Beseitigung von Kontakt-
geräuschen erhofft. Außerordentlich groß ist die Anpassungs-
fähigkeit des Wählers an die Betriebsformen, so daß er als
Einheitswähler für alle Stufen im Orts- und Fernverkehr, ja
selbst bei vierdrähtiger Durchschaltung zur Anwendung
kommen kann. — Mit der Beschreibung des Wählers ver-
bindet der Verf. völlig neue Vorschläge für den Systemaufbau
und berührt damit auch die Frage der 100- bzw. 200-Teiligkeit
der Wählerkonstruktion. Während er für den Regelverkehr
bei der 100teiligen Ausführung in der Anrufsucher- und
Leitungswählerstufe bleibt, empfiehlt er zum Spitzenaus-
gleich den Einsatz einiger den Verkehrszahlen entsprechender
200teiliger Wähler, die mit Gruppeneinwahl die Verkehrs-

spitzen und Schwankungen zweier Nachbargruppen aufzu-
nehmen haben. Neben dieser, in der Anrufsucher- und
Leitungswählerstufe angewendeten Maßnahme beschreibt der
Verf. auch die Möglichkeit, den Motorwähler als Doppel-
betriebswähler zugleich als Anrufsucher und Leitungswähler
anzusetzen, auch hier nicht für den Regelverkehr, sondern
nur für die Spitzen, und damit einen Verkehrsausgleich
zwischen den Schwankungen des ankommenden und ab-
gehenden Verkehrs zu schaffen. Das Buch bringt für diese
neue Systemanordnung Berechnungen der benötigten Wähler-
zahlen und zeigt Stromkreise für die einzelnen Wählerstufen,
für die Kettenschaltung der Anrufsucher und bringt Wirt-
schaftsuntersuchungen über die zweckmäßigste Ausbildung
der Wählerrahmen in vertikalem oder horizontalem Aufbau.
Entsprechend dem geplanten Einsatz im künftigen Fernwahl-
netz wird die Frage getrennter Orts- und Fernleitungswähler,
die zweckmäßigste Eingliederung des Handfernverkehrs und
die Einschaltung des Wählers in Vierdrahtverbindungen des
halb- und vollautomatischen Fernverkehrs gezeigt. Von
einer Anwendung des Kreislaufprinzips verspricht sich der
Verf. keinen Vorteil, ebensowenig von einer Mehrfachaus-
nutzung unter Anwendung aufgeteilter kleiner Drehwähler.
Von großem Interesse sind die Angaben über die zu erwar-
tenden Betriebskosten, die Staubschutzmaßnahmen und eine
Reihe grundlegender Untersuchungen über den Einfluß des
Frittstromes auf den Kontaktwiderstand und die Gefahr der
Geräuschbildung in der Verbindung bzw. des Schwundes. Es
darf erwartet werden, daß die vom Verf. hier neu ge-
brachten Angaben in der Fachliteratur Anlaß zu lebhaften
Auseinandersetzungen bilden werden. — Jedenfalls bringt
das Buch eine außerordentlich klare und vielseitige Behand-
lung der neuen Wählerkonstruktionen und ihrer Anwendungs-
möglichkeiten und wird von der gesamten Fachwelt mit
größtem Interesse aufgenommen werden. MARTIN HEBEL.

W. O. Schumann: Elektrische Wellen. Eine Einführung
in die räumliche Ausbreitung elektromagnetischer Vorgänge.
München: Carl Hanser 1948. 340 S. u. 248 Abb., M 28,50.

W. O. SCHUMANN, dem eine ganze Generation von
Studenten der Münchener Hochschule ihre theoretisch-
elektrische Ausbildung verdankt, gibt in diesem Buch eine
erweiterte Darstellung seiner Vorlesung über das elektro-
magnetische Wellenfeld. Infolge der täglich sich erweiternden
Möglichkeiten, Wechselfelder immer höherer Frequenz zu
erzeugen, ist das Problem der elektromagnetischen Welle
heute nicht mehr nur für wenige Spezialisten interessant,
sondern rückt allgemein in den Arbeitsbereich des Elektro-
technikers und des technischen Physikers. Im Ausland sind
in den letzten Jahren bereits eine größere Zahl von Büchern
erschienen, die dieses Thema vom Standpunkt der Hochfre-
quenztechnik behandeln. Das Erscheinen eines zusammen-
fassenden Werkes, eines deutschen Autors, das mehr als eine
„Einführung“ enthält und wesentlich über den engen In-
teressenbereich der Hochfrequenztechnik hinausgeht, ist
daher sehr zu begrüßen. Das Buch gibt uns unter ordnenden
und auserwählten Gesichtspunkten eine Darstellung der zur
Zeit bekannten Lösungen der MAXWELLSchen Feldgleichun-
gen, insbesondere auch der schwierigeren Fälle, die bisher
nur aus den zahlreichen Einzelarbeiten mit großer Mühe ent-
nommen werden konnten. Entscheidend für den Leser
dürfte die Anschaulichkeit der Darstellung sein, über deren
Qualität man nach der fast 30jährigen Hochschultätigkeit
des Autors keine Worte zu verlieren braucht.

Der Inhalt: In einigen einleitenden Abschnitten sind die
physikalischen Grundlagen und mathematischen Hilfsmittel
dargestellt. Zunächst werden die Anwendungen der ebenen
Welle beschrieben, also derjenigen Wellen, die keine Feld-
komponenten in der Fortpflanzungsrichtung besitzen (Welle
im Dielektrikum, Welle im Leiter, Reflexion, Medium mit
freien Elektronen, Welle der homogenen Leitung). Dann fol-
gen die Wellen mit longitudinalen Komponenten, geordnet
nach der Art der longitudinalen Komponente (E-Wellen und
H-Wellen in idealen Hohlleitern, Hohlraumresonatoren,
Wellen in leitenden Zylindern). Anschließend wird der
schwierige Fall der Wellenfortpflanzung in geschichteten
Medien an Hand der Wellenausbreitung längs ebener Platten
behandelt und auf das zylinder-symmetrische Problem aus-
gedehnt. Den Abschluß bildet die sphärische Welle, also die
Ausstrahlung des elektrischen oder magnetischen Dipols in
den freien Raum. H. MEINKE.

M. Czerny: Anweisungen zum physikalischen Anfänger-Praktikum unter Mitarbeit von H. Müser. Frankfurt a. M.: Theodor Steinkopff 1948. 114 S. u. 63 Abb. M 8.—

In dem anspruchslosen Büchlein von CZERNY sind die Anleitungen zu den Versuchen des Frankfurter physikalischen Praktikums gesammelt.

Sehr beherzigenswert für jeden Studenten ist der erste Abschnitt über Fehlerabschätzung, Zahlenrechnung, graphische Darstellung usw. Im übrigen schließt sich das Buch speziell an das Frankfurter Praktikum an (z. B. S. 55: „eine links aufgestellte Glühlampe“, S. 61: „Auf dem Arbeitstisch befindet sich eine besondere 4 V-Steckdose“, S. 72: „Wegen Zuckermangels Weinsäure“). Schwierigkeiten werden mehrmals dadurch aus dem Wege geräumt, daß „sofort der Assistent zu Hilfe zu rufen“ ist.

Die Auswahl der 32 Aufgaben aus Mechanik, Wärmelehre und Optik ist ungefähr so, wie sie seit Jahrzehnten in allen Ländern den Studenten geboten wird. Die Erklärung der Versuche ist schlicht, Formeln, in die die gemessenen Werte einzusetzen sind, werden nicht immer abgeleitet. Ungewöhnlich ist die Prüfung eines Aneroidbarometers und die einer rotierenden Ölpumpe. Dagegen fehlen die Dampfdichtbestimmungen nach DUMAS und nach VICTOR MEYER.

Die 20 Aufgaben aus der Elektrizitätslehre sind dagegen zum großen Teil modern und für ein Anfängerpraktikum neuartig. So die Untersuchung von Haupt- und Nebenschlußmotoren; von Transformatoren (Schlagweite!), die Messung von Kapazität (auch elektrostatisch) und Selbstinduktion, ferner Steilheit, Durchgriff und innerer Widerstand von Radoröhren, Magnetfeldmessung mit der Wismutspirale, Charakteristik einer Photozelle, Halbwertszeit von Thoriumemanation. So bietet das Werk auch dem „erwachsenen Physiker“ einen reichen Schatz an Anregung zum Aufbau neuer Praktikumsversuche.

In seinem Vorwort schreibt Herr CZERNY: „Bei der Ausgestaltung der vorliegenden ersten Auflage mußte der Gesichtspunkt der Schnelligkeit und des überhaupt erreichbaren vorangestellt werden. Es ist zu hoffen, daß spätere Auflagen unter günstigeren Bedingungen werden folgen können.“ Hierbei sollte besonders der Druck auf das Niveau des Inhaltes gehoben werden.

V. ANGERER.

W. Oppelt: Grundgesetze der Regelung. (Bücher der Technik. Herausgeber: Dr. Ing. H. KULENKAMP. Notdruck.) Wolfenbüttel-Hannover: Wolfenbütteler Verlagsanstalt G. m. b. H. 1947. DIN A 4. 118 S., 32 Abb. u. 28 Tafeln. geh. M 10.—

Die Anwendung des Prinzips der selbsttätigen Regelung, welche man heute auf allen Gebieten der Technik findet, ist schon sehr alt. Jedoch entdeckte man erst relativ spät, daß sich die dabei auftretenden Probleme von einem übergeordneten Gesichtspunkt aus einheitlich theoretisch behandeln und mathematisch darstellen lassen. Zu denen, welche in dieser Richtung gearbeitet haben, gehört auch der dem Ref. durch seine einschlägigen Veröffentlichungen bekannte, auf diesem Fachgebiet praktisch tätige Verf. des Buches. Gemäß dem Vorwort ist dieses für den Lernenden geschrieben. Es bringt nach einer Einführung (I), welche die *Merkmale, Ziele, Aufbau des Regelkreises* und den *gerätechnischen Aufbau* enthält, eine Beschreibung des *Verhaltens der Regelkreisglieder* (II), wobei zuerst die verschiedenen Möglichkeiten der theoretischen Behandlung (mittels Differentialgleichung, Frequenzgang, Übergangsfunktion) aufgezeigt und danach der Charakter der verschiedenen Regelkreisglieder und deren Verbindungsmöglichkeiten erläutert werden. Der Hauptabschnitt (III) befaßt sich mit dem Regelkreis als Einheit und geht

vor allem näher auf die wichtigen Punkte: *Steuerung, Störung, Stabilität und Instabilität eines Regelkreises* ein.

Die Darstellung mußte natürlich infolge des im Verhältnis zu der Fülle des Gebrachten geringen Umfanges des Buches sehr komprimiert ausfallen. Jedoch unterstützen zahlreiche einprägsame und die Wirkung der dargestellten Objekte klar erkennen lassende Prinzipbilder von Ausführungsformen von Elementen (Fühler, Übertragungsmittel, Kraftschalter, Rückführungen usw.), sehr viele Diagramme und Tafeln, welche Ortskurven, Stabilitätsdiagramme und ähnliches enthalten den Text und bilden auch für sich allein schon eine wertvolle Zusammenstellung. Sie geben dem mit der Materie bereits etwas Vertrauten einen Hinweis, wie mannigfaltig und verschieden die praktischen Ausführungen sein können, welche alle unter einen einheitlichen Begriff, z. B. desjenigen des Systems gegebener Ordnung zusammengefaßt werden können. Sie zeigen ihm auch, daß ein Fall, den er vielleicht gerade zu bearbeiten hat, nur ein Spezialfall einer Kategorie ist, dessen Eigengesetzlichkeit innerhalb dieser durchaus nicht etwas Besonderes ist. Wer sich daher über sein eigenes spezielles Gebiet der Regeltechnik hinausgehend informieren will, dem kann das Buch bestens empfohlen werden; er wird es mit Nutzen lesen. Im Sinne der auf der Titelseite angegebenen Tendenz, welche der Herausgabe der Notdrucke zugrunde liegt, gilt dies auch für den Studenten zum Gebrauch neben der Vorlesung. Jedoch möchte es Ref. scheinen, als ob es den im Vorwort angegebenen Zweck nur mit dieser Einschränkung erfüllt. Der Anfänger, welcher sich ausschließlich an Hand dieses Buches in die Theorie der selbsttätigen Regelung einarbeiten will, wird gerade bei den Tafeln wissen wollen, wie z. B. die angegebenen Gleichungen aus den danebenstehenden Bildern von aktiven oder passiven Gliedern abgeleitet werden. Vermutlich wird diese Lücke das im Vorwort angekündigte zweite Büchlein, dem man nach der Lektüre dieses ersten mit großem Interesse entgegensieht, ausfüllen. Auch wird sich derjenige Lernende, der noch nicht mit der komplexen Schreibweise vertraut ist und der noch nicht die Begriffe Ortskurve und Übergangsfunktion kennt, beim Studium an Hand dieses Buches nach Meinung des Ref. etwas schwer tun. Der fertige Technische Physiker dagegen wird das Büchlein zur ersten Information mit Vorteil in die Hand nehmen.

Die bei einer Neuherausgabe eines Buches natürlicherweise auftretenden kleinen Unzulänglichkeiten fehlen nicht: Auf S. 99 ist z. B. in der Formel von EULER der Faktor 2 hinzuzufügen. Unangenehm kann sich für den Benutzer der Gl. (55) das falsch gesetzte Ungleichheitszeichen auswirken (es muß statt < 0 richtig > 0 heißen). Bild 22 folgt erst nach Bild 26 (es dürfte sich bei einer Neuauflage vielleicht empfehlen, die Unterscheidung zwischen Bild und Tafel wegfallen zu lassen). S. 71 in der Anmerkung 44, Zeile 13 muß es richtig $D = \delta / \sqrt{\delta^2 + \omega^2}$ und in Zeile 9 statt ω richtig $i\omega$ heißen. Dieser letztere Hinweis gibt Ref. Anlaß zu einer Bemerkung, welche im Interesse des einheitlichen Gebrauchs einer einwandfreien Terminologie gemacht wird. In der komplexen Darstellung einer Schwingung $q_0 \cdot e^{i\Omega t}$ bezeichnet man den Faktor Ω im Exponenten üblicherweise als Frequenz. Ist diese rein reell ($\Omega = \omega$), so hat man es mit einer rein harmonischen Schwingung zu tun. Ist dagegen Ω komplex ($\Omega = \omega + i\delta$), so klingt die Schwingung mit der Zeit ab — gedämpfte Schwingung. Sinngemäß ist es daher, von komplexer Frequenz zu sprechen, wenn ein Ausdruck von der Form $\omega + i\delta$ vorliegt, und $i\Omega = i(\omega + i\delta) = -\delta + i\omega = p$ etwa als „komplexe Dämpfungskonstante“ oder „komplexen Dämpfungsfaktor“ p zu bezeichnen, da reine Dämpfung vorhanden ist, wenn $p = \text{reell} = -\delta$, d. h. $\omega = 0$ ist.

STEFANIAK.